



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS
DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

**CAMBIOS EN EL SISTEMA ENZIMÁTICO ASOCIADOS
AL ABLANDAMIENTO Y OSCURECIMIENTO POR
EFECTO DE LA APLICACIÓN DE UN TRATAMIENTO
HIDROTÉRMICO Y ASCORBATO DE CALCIO EN
BERENJENA**

TESIS

Que presenta:

MC. Denisse Aurora Díaz Corona

Para obtener el Grado de
DOCTORA EN CIENCIA
Y
TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Directores

DR. MISAEL ODÍN VEGA GARCÍA
DRA. MARTHA EDITH LÓPEZ LÓPEZ



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Fisiología y Tecnología Poscosecha del posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, bajo la dirección del Dr. Misael Odín Vega García y la Dra. Martha Edith López López y asesoría de la Dra. Lidia Elena Ayón Reyna y de los Dres. Roberto Gutiérrez Dorado y José de Jesús Caro Corrales. Contó con financiamiento de PROFAPI PRO A07_006. La C MC. Denisse Aurora Díaz Corona recibió Beca Nacional para Estudios de Posgrado (Doctorado en Ciencias) por parte del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) durante la realización de estudios de doctorado (cuatro años).

AGRADECIMIENTOS

A mi **mamá**, por todo su apoyo y palabras de aliento durante todo este proceso, por darme la motivación que en ocasiones me hacía falta, por ser el mejor ejemplo y la mejor mamá que pude tener, así como su toda la ayuda que me proporcionó antes, durante y después de todo este proceso.

A mi hermano **Lenin**, por ser una gran motivación y el mejor ejemplo de hermano que cualquiera podría tener.

A toda mi familia por el apoyo e interés prestado a mis estudios y todos los buenos momentos.

A mis amigos, compañeros de trabajo y alumnos por escucharme siempre que lo necesité, por darme palabras de aliento y por su amistad.

A la **Universidad Autónoma de Sinaloa** y al **Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos**, por permitirme ser parte de su programa y brindarme los recursos necesarios para continuar con mi educación. Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT)** por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

A mis directores de tesis **Dr. Misael** por todos sus excelentes consejos, paciencia y su disponibilidad para atenderme cada vez que tenía una duda, a la **Dra. Martha** por toda la ayuda que me brindo durante mi estancia en el laboratorio, sus

regaños y sus consejos. Así como mis asesores **Dra. Lidia y Dres. Roberto Gutiérrez y Dr. José Caro** por su apoyo en la realización de mi tesis.

A mis compañeros y amigos de laboratorio **Ernesto, Johanna, Blanca, Jordi, Lidia, Gaby, Karla y Kassandra** porque siempre estuvieron dispuestos a prestar su ayuda cuando se necesitó y por tener el mejor ambiente de trabajo que puede haber.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	ix
I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN.....	7
III. REVISIÓN DE LITERATURA	11
A. BERENJENA.....	11
1. Origen y distribución	11
2. Aspectos botánicos y clasificación taxonómica.....	12
3. Composición química y nutrimental.....	16
4. Producción e importancia económica.....	17
B. MANEJO POSCOSECHA.....	21
1. Ablandamiento del tejido	22
2. Oscurecimiento en pulpa	24
3. Tratamientos Poscosecha	25
a. Sales de calcio.....	27
b. Tratamiento hidrotérmico.....	30
IV. JUSTIFICACIÓN	34
V. OBJETIVOS.....	36

A. OBJETIVO GENERAL	36
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	36
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	38
A. MATERIALES	38
1. Obtención de la materia prima	38
B. MÉTODOS	38
1. Diseño experimental	38
2. Proceso de optimización	38
a. Modelo de respuesta	38
b. Respuestas	42
1) Actividad de Pectinmetilesterasa (PME)	42
2) Diferencia total de color (ΔE)	43
3) Firmeza	43
4) Contenido de antocianinas	44
3. Uso de condiciones óptimas del THO, AscCa y su combinación (TH-AscCa)	45
a. Materiales	45
4. Parámetros de calidad	45
a. Índice de oscurecimiento (IO)	45
b. Porcentaje de pérdida de peso (%PP)	45

c	Firmeza.....	46
5.	Determinación de la actividad de enzimas de la pared celular en respuesta al estrés abiótico	46
a	Preparación del extracto enzimático.....	46
b	Evaluación de la actividad de PME.....	46
c	Evaluación de la actividad de PG	46
d	Evaluación de la actividad de β -GAL	47
6.	Contenido de calcio.....	48
7.	Determinación del daño en la estructura celular	48
a.	Microscopía óptica.....	48
8.	Evaluación de las enzimas relacionadas con la aparición del oscurecimiento enzimático	49
a.	Polifenol oxidasa (PPO).....	49
b.	Peroxidasa (POD).....	50
9.	Presencia de compuestos bioactivos	50
a	Compuestos fenólicos totales.....	50
b	Antocianinas totales.....	51
c	Ácido clorogénico.....	52
10.	Diseño estadístico	53
VII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54

A. CONDICIONES ADECUADAS DE TIEMPO Y TEMPERATURA PARA LA APLICACIÓN DE UN TRATAMIENTO HIDROTÉRMICO	54
1. Modelos experimentales de predicción	54
a. Pectinmetilesterasa	56
b. Diferencia total de color (ΔE)	59
c. Firmeza.....	62
d. Contenido de antocianinas	65
2. Optimización.....	68
B. ANÁLISIS DE CALIDAD	70
1. Índice de oscurecimiento	70
2. Pérdida de peso (%PP)	73
3. Firmeza.....	76
C. ACTIVIDAD DE ENZIMAS DEGRADADORAS DE PARED CELULAR	79
1. Pectinmetilesterasa	79
2. Poligalacturonasa (PG)	82
3. β - Galactosidasa (β - Gal)	85
D. CONTENIDO DE CALCIO	88
1. Contenido de calcio en cáscara	88
2. Contenido de calcio en pulpa	92
E. DETERMINACIÓN DEL DAÑO EN LA ESTRUCTURA CELULAR	95

1. Microscopía óptica.....	95
F. ACTIVIDAD DE ENZIMAS OXIDATIVAS	100
1. Polifenol oxidasa (PPO).....	100
2. Peroxidasa (POD).....	104
G. CONTENIDO DE COMPUESTOS FENÓLICOS.....	107
1. Compuestos fenólicos totales	107
2. Contenido de antocianinas totales	110
3. Contenido de ácido clorogénico.....	114
VIII. CONCLUSIONES.....	118
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	120
ABREVIATURAS.....	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1	Flores de la familia <i>Solanaceae</i>	14
2	Variaciones en cultivares de berenjena	15
3	Esquema simplificado del proceso de oscurecimiento enzimático	26
4	Modelo caja de huevo en la gelificación inducida por Ca^{2+} .	29
5	Diagrama esquemático de los procesos de desmetilación al azar y en bloque	31
6	Gráfica de contornos (a) y de superficie de respuesta (b), donde se muestra el efecto de la temperatura (T) y tiempo (t) sobre la actividad de PME	58
7	Gráfica de contornos (a) y de superficie de respuesta (b), donde se muestra el efecto de la temperatura (T) y tiempo (t) sobre la variación de color (ΔE)	61
8	Gráfica de contornos (a) y de superficie de respuesta (b), donde se muestra el efecto de la temperatura (T) y tiempo (t) sobre la firmeza	64

9	Gráfica de contornos (a) y de superficie de respuesta (b), donde se muestra el efecto de la temperatura (T) y tiempo (t) sobre el contenido de antocianinas	67
10	Gráfico que muestra la región con la mayor combinación de variables del proceso de TH (T = 40°C/ t = 15 min)	69
11	Cambios en el índice de oscurecimiento en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	71
12	Cambios en la pérdida de peso en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	74
13	Cambios en el parámetro firmeza en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	77
14	Cambios en la actividad de la enzima PME en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	80
15	Cambios en la actividad de la enzima PG en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	83
16	Cambios en la actividad de la enzima β -GAL en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	87
17	Cambios en el contenido de calcio en cáscara de berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	89

18	Cambios en el contenido de calcio en pulpa de berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	93
19	Cambios en la estructura de la pared celular, evaluada por microscopía óptica en el día 5 de almacenamiento en berenjenas tratadas con un TH, AscCa y TH-AscCa	96
20	Cambios en la estructura de la pared celular, evaluada por microscopía óptica en el día 20 de almacenamiento en berenjenas tratadas con un TH, AscCa y TH-AscCa	98
21	Cambios en la actividad de la enzima PPO en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	101
22	Cambios en la actividad de la enzima POD en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	105
23	Cambios en el contenido de compuestos fenólicos totales en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	108
24	Cambios en el contenido total de antocianinas en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	111
25	Cambios en el contenido de ácido clorogénico en berenjena tratada con un TH, AscCa y TH-AscCa	115

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Página
1	Clasificación taxonómica de la berenjena	13
2	Composición química de la berenjena	18
3	Principales países productores de berenjena en el año 2023	19
4	Principales estados productores de berenjena en México en el año 2023	20
5	Factores y niveles de las variables del proceso empleadas en el diseño experimental ($\alpha= 1.414$)	40
6	Diseño experimental empleado para obtener diferentes combinaciones de temperatura (T) y tiempo (t)	41
7	Diseño experimental empleado para obtener diferentes combinaciones de temperatura (T) y tiempo (t) para la aplicación de un tratamiento hidrotérmico y variables de respuesta (firmeza, ΔE , PME, contenido de antocianinas)	55

I. RESUMEN

La berenjena es un producto hortofrutícola ampliamente reconocido por su capacidad antioxidante alta y por ser una fuente valiosa de compuestos fenólicos. Al ser un fruto no climatérico es recolectado cuando está listo para su consumo, debido a esto, es importante que se les proporcione un almacenamiento inmediato a temperaturas moderadas (10-12 °C), ya que podría presentar síntomas de ablandamiento acelerado y oscurecimiento. Estudios previos en diversos frutos han demostrado que la aplicación de tratamientos previo al almacenamiento a temperaturas moderadas contribuye a disminuir la deterioración acelerada del fruto.

En este sentido, las sales de calcio actúan como agentes reafirmantes en la pared celular de diversos frutos al formar pectatos de calcio entre las cadenas de pectinas. Por su parte, el tratamiento hidrotérmico a temperaturas moderadas genera un estrés moderado en productos hortofrutícolas lo que induce la activación de un mecanismo de respuesta que incluye la reducción de la actividad de enzimas oxidativas, como polifenoloxidasas (PPO), gracias a que provoca su desnaturalización parcial. Asimismo, este tratamiento favorece la activación de enzimas de la pared celular, como pectinmetil esterasa (PME), la cual genera la desmetilación de las pectinas, generando un mayor número de sitios de unión para que los iones de calcio se puedan acoplar. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo consistió en evaluar el efecto de un tratamiento hidrotérmico óptimo en combinación con una sal de calcio sobre la actividad/presencia de enzimas responsables de la degradación de la pared celular y oscurecimiento, así como el contenido de compuestos fenólicos y cambios micro estructurales en berenjena almacenada a temperatura comercial.

Los resultados de metodología de superficie de respuesta (MSR) mostraron una activación en la actividad de PME junto con una retención de los atributos de calidad y condiciones óptimas de 40 °C y 15 min. Los valores predichos de actividad de PME, parámetro de color (ΔE), firmeza y contenido de antocianinas, usando los modelos de predicción de cada una de las variables de respuesta y las condiciones óptimas del tratamiento hidrotérmico (TH) fueron 1.99 U/g ff, 1.12, 29.9 N y 4.05 EC3G/g base seca (bs), respectivamente. El TH obtenido con las condiciones óptimas se desarrolló aplicando la mejor combinación de variables de tiempo y temperatura. Los valores experimentales de actividad de PME, parámetro ΔE , firmeza y contenido de antocianinas obtenidos con condiciones óptimas (1.62 U/g ff, 1.09, 31.32 N y 4.74 EC3G/g bs, respectivamente) fueron similares a los valores predichos mencionados anteriormente, indicando que las condiciones óptimas del proceso del TH fueron adecuadas y reproducibles. Por tanto, la aplicación de las condiciones optimizadas (40 °C, 15 min) es la más adecuada para mantener la calidad de las berenjenas frescas.

Asimismo, los tratamientos con calcio lograron reducir la actividad de las enzimas degradadoras de pared celular. Además, se reportó menor daño en el epicarpio y mesocarpio de las muestras tratadas con calcio. Así como un incremento constante en la actividad de las enzimas oxidativas (polifenoloxidasas y peroxidasas) a medida que pasaron los días de almacenamiento. De igual manera, se observaron diferencias significativas en el contenido de compuestos bioactivos, donde se encontró una mayor cantidad de compuestos fenólicos totales (17.76 mg GAE/100 g) y ácido clorogénico (5.9715 $\mu\text{g CA/mg EM}$), sin embargo, se observó una mayor pérdida de antocianinas en los tratamientos en comparación con control.

Por lo que, la aplicación de un tratamiento hidrotérmico óptimo (THO) en combinación con ascorbato de calcio (AscCa) puede ser una estrategia sumamente útil para retrasar la pérdida de calidad de frutos de berenjena y de esta manera alargar su vida de anaquel. Además, ambos tratamientos THO y AscCa son inocuos y ambientalmente seguros, además de que no generan un impacto económico considerable.

ABSTRACT

Eggplant is a vegetable product widely recognized for its high antioxidant capacity and for being a valuable source of phenolic compounds. As a non-climacteric fruit, it is harvested when it is ready for consumption. Due to this, it is important to provide immediate storage at moderate temperatures (10-12 °C), since it might present symptoms of accelerated softening and darkening. Previous studies on various fruits have shown that the application of treatments prior to storage at moderate temperatures contributes to reducing accelerated deterioration of the fruit.

In this sense, calcium salts act as firming agents in the cell wall of various fruits by forming calcium pectates between the pectin chains. For its part, hydrothermal treatment at moderate temperatures generates moderate stress in fruit and vegetable products, which induces the activation of a response mechanism that includes the reduction of the activity of oxidative enzymes, such as polyphenol oxidase (PPO), thanks to the fact that it causes their partial denaturation. Likewise, this treatment favors the activation of cell wall enzymes, such as pectinmethyl esterase (PME), which generates the demethylation of pectins, generating a greater number of binding sites so that calcium ions can attach. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effect of an optimal hydrothermal treatment in combination with a calcium salt on the activity/presence of enzymes responsible for the degradation of the cell wall and darkening, as well as the content of phenolics compounds and microstructural changes in eggplant stored at commercial temperature.

Response surface methodology (RSM) results showed an activation in PME activity along with a retention of quality attributes and optimal conditions of 40 °C and 15 min. The predicted values of PME activity, color parameter (ΔE), firmness and anthocyanin content, using the prediction models of each of the response variables and the optimal conditions of the hot water treatment (HWT) were 1.99 U/g ff, 1.12, 29.9 N and 4.05 EC3G/g dry basis, respectively. The HWT obtained with the optimal conditions was developed by applying the best combination of time and temperature variables. The experimental values of PME activity, ΔE parameter, firmness and anthocyanin content obtained with optimal conditions (1.62 U/g ff, 1.09, 31.32 N and 4.74 EC3G/g ds, respectively) were similar to the predicted values mentioned above, indicating that the optimal conditions of the HWT process were adequate and reproducible. Therefore, the application of the optimized conditions (40 °C, 15 min) is the most appropriate to maintain the quality of fresh eggplants.

Likewise, calcium treatments managed to reduce the activity of cell wall degrading enzymes. In addition, less damage was reported in the epicarp and mesocarp of the samples treated with calcium. As well as a constant increase in the activity of oxidative enzymes (polyphenoloxidase and peroxidase) as the days of storage passed. Similarly, significant differences were observed in the content of bioactive compounds, where a greater amount of total phenolic compounds (17.76 mg GAE/100 g) and chlorogenic acid (5.9715 $\mu\text{g CA/mg ME}$) was found, however, it was detected a greater loss of anthocyanins in the treatments compared to control.

Therefore, the application of an optimal hot water treatment (OHWT) in combination with calcium ascorbate (CaAsc) can be an extremely useful strategy to

delay the loss of quality of eggplant fruits and thus extend their shelf life. Furthermore, both OHWT and CaAsc treatments are harmless and environmentally safe, and do not generate a considerable economic impact.

II. INTRODUCCIÓN

La berenjena (*Solanum melongena* L.) es una hortaliza que se cultiva en climas tropicales y subtropicales. Es muy popular en Asia y en algunos países del Mediterráneo, por lo que el 80% de la producción global aproximadamente proviene de China e India. Esta hortaliza es particularmente rica en compuestos como ácido linoleico, fructosa, ácido málico y una gran cantidad de compuestos bioactivos, especialmente compuestos fenólicos como flavonoides (antocianinas) y ácidos fenólicos (ácido clorogénico) encontrados predominante en cáscara y pulpa, respectivamente, los cuales han sido relacionados con diversos beneficios a la salud (Sharma y Singh 2009; Ferarsa y col 2018). Las antocianinas son predominantemente glucósidos de polihidroxi y polimetoxi derivados de sales catiónicas de 2-fenilbenzopirilio. Además de ser colorantes naturales, las antocianinas tienen múltiples roles biológicos; efecto antiinflamatorio, actividad antioxidante, actividad antimicrobiana, inhibición de la agregación plaquetaria sanguínea, tratamiento de retinopatía diabética y prevención de la aterosclerosis inducida por el colesterol (Zhang y col 2020; Luan y col 2023).

Las antocianinas son el mayor grupo de pigmentos naturales solubles en agua, son una subclase de flavonoides que imparten color a diversos productos hortofrutícolas (Luan y col 2023). Asimismo, son compuestos inestables que se degradan fácilmente, esta degradación puede verse afectada por varios factores exógenos y endógenos, como el contenido de proteínas, oxígeno, luz, pH, iones metálicos, pero especialmente tratamientos térmicos (Sinela y col 2017). En cuanto al

contenido de ácido clorogénico (CAC) se refiere, este es un ácido fenólico que se ha reportado que ejerce como un agente anti-obesogénico, antiinflamatorio, antimutagénico, anticancerígeno, además de que ejerce funciones cardioprotectivas (Naeem y Ugur, 2020).

Las berenjenas en su mayoría son distribuidas como frutos frescos, ya que son cosechadas y empaquetadas directamente en el campo, con el fin de reducir pérdidas en su calidad, ablandamiento acelerado y oscurecimiento del tejido (Mariano-Nasser y col 2019; Ohyama y col 2022). El almacenamiento poscosecha de la berenjena a temperatura ambiente reduce rápidamente la calidad de la fruta. Cuando los frutos son almacenados a temperaturas entre los 10 y 12 °C se logra reducir su velocidad de deterioro, alargando su vida de anaquel más allá de los 7 días de almacenamiento; sin embargo, los procesos de oscurecimiento en el tejido interno y pérdida de firmeza se siguen llevando a cabo (Concellón y col 2005).

Para combatir y reducir el oscurecimiento y ablandamiento en diversos productos hortofrutícolas, se ha implementado el uso de diferentes tratamientos, tales como el uso de tratamientos hidrotérmicos (TH) (Díaz-Corona y col 2020), 1-metilciclopropeno (1-MCP) (Alkan y col 2022), sales de calcio (Díaz-Corona y col 2020), soluciones orgánicas de pH bajo (Lemos y col 2023), entre otros. En particular, la aplicación de tratamientos hidrotérmicos ha demostrado ser efectivo como un medio físico, no tóxico y seguro para mantener la calidad poscosecha de diversos productos hortofrutícolas (Önder y col 2021). Además, este tratamiento puede proteger contra diversos desordenes fisiológicos, por lo cual ha sido utilizado como un tratamiento alternativo para el control de calidad (Díaz-Corona y col 2020).

Sin embargo, se ha reportado en diversos estudios (Miranda y col 2007; Šilarova y col 2019) que, durante el almacenamiento de berenjena, su contenido de CAC se ve disminuido, mientras que cuando se les es aplicado tratamientos con temperaturas altas (cocción, horneado, parrilla), el contenido de CAC aumenta. Durante la aplicación de dichos tratamientos, los frutos de berenjena desarrollan algunas áreas oscuras, donde se concentran compuestos fenólicos, los cuales pueden poseer actividades antioxidantes. El oscurecimiento está relacionado con la actividad de las enzimas PPO y peroxidasa (POD), compuestos fenólicos y la presencia de oxígeno dando lugar a la formación de melanoidinas (Miranda y col 2007).

Asimismo, la aplicación excesiva de calor puede tener un efecto negativo en la maduración, debido al aumento en la activación de enzimas degradadoras de pared celular, como pectinmetilesterasa (PME) (EC 3.1.11) y poligalacturonasa (PG) (EC 3.2.1.15), las cuales son dos de las principales enzimas que actúan sobre la pectina de la pared celular (Alkan y col 2022). PME y PG actúan conjuntamente para aumentar la solubilización de la pared celular provocando un ablandamiento en el fruto. (Díaz-Corona y col 2020).

El ablandamiento del tejido está asociado a alteraciones en la estructura de la laminilla media, donde la pectina, celulosa y hemicelulosa sufren modificaciones estructurales durante la maduración debido a la actividad de enzimas degradadoras de pared celular. La actividad de estas enzimas conduce a la solubilización de la pectina de la pared celular. Además de las enzimas, existen otros factores que pueden contribuir al ablandamiento de la fruta. Estos incluyen diferencias en las estructuras de la pared primaria para diferentes variedades de frutos, que pueden estar constituidas

por diferentes proporciones de polisacáridos y glucoproteínas, minerales iónicos y unidos covalentemente, así como ésteres fenólicos (Zhang y col 2022).

La aplicación de calcio exógeno permite la formación de pectatos de calcio dando estabilidad a la lámina media, pared y membrana celular, evitando así el rápido ablandamiento en el fruto (García-Martínez y col 2015). Dicho efecto se ve potencializado cuando una sal de calcio se aplica en combinación con el tratamiento hidrotérmico (Ayón–Reyna y col 2015), ya que la aplicación de un tratamiento térmico previo al almacenamiento a temperaturas de refrigeración ha demostrado poseer un efecto benéfico en lechuga (Martin-Diana y col 2005), pepino (Nasef 2018) y kiwi (Ma y col 2014), ya que provoca cambios en la actividad metabólica y permite la desnaturalización de proteínas con actividad enzimática de enzimas como PPO y POD.

La aplicación de un tratamiento con agua caliente se ha llevado a cabo previamente en frutos de berenjena (Alkan y col 2022; Lemos y col 2023). Sin embargo, no se ha realizado ningún modelo matemático para encontrar las condiciones adecuadas de aplicación de dicho tratamiento. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de un tratamiento hidrotérmico óptimo en combinación con una sal de calcio sobre la actividad/presencia de enzimas responsables de la degradación de la pared celular y oscurecimiento, así como el contenido de compuestos fenólicos y cambios micro estructurales en berenjena almacenada a temperatura comercial.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

A. BERENJENA

La berenjena es una hortaliza muy importante debido a sus propiedades nutricionales y su valor económico, ya que se ha mencionado en la literatura su potencial como una fuente invaluable de compuestos bioactivos (Luthria 2012; Braga y col 2016). Esta hortaliza pertenece a la familia de las *Solanáceas*, y al igual que otros cultivos de esta familia como tomate, papas y chile morrón, es cultivada en todos los continentes (Rotino y col 2014). La berenjena es un cultivo de rendimiento sumamente alto y es fácilmente adaptable a ambientes húmedos y calientes. Es por esto que tiende a permanecer asequible, aun cuando el precio de otros cultivares sufre aumentos (Niño-Medina y col 2017).

Esta hortaliza tiene una amplia variedad en cuanto a tamaño, color y forma, asimismo; presenta un patrón de respiración no climatérico, por lo que debe de ser cosechado una vez que alcanza su madurez comercial (Taher y col 2017).

1. Origen y distribución

La berenjena es originaria de las zonas tropicales y subtropicales asiáticas. Los primeros reportes de cultivo de esta hortaliza mencionan que ya se cultivaba en Egipto hacia el año 1,200, donde fue introducida en la Edad Media a través de la Península Ibérica y Turquía, para posteriormente extenderse por el Mediterráneo y el resto de Europa, siendo originalmente cultivada en la India, Birmania y China. Fue hasta el siglo XVII cuando se introdujo en la alimentación, tras ser utilizada en medicina para combatir inflamaciones cutáneas y quemaduras (Daunay y col 1997).

2. Aspectos botánicos y clasificación taxonómica

Existe una extensa diversidad en cultivos de berenjena en términos de sus características bioquímicas, fenotipo y fisiología (Taher y col 2017). Dentro la clasificación de angiospermas, la berenjena pertenece a la familia *Solanaceae* y a la especie *Solanum melongena* L. (**Cuadro 1**).

La familia *Solanaceae* está compuesta por 83 géneros que engloban aproximadamente entre 1000-1400 especies de amplia distribución por todo el mundo, especialmente en zonas templadas y tropicales. Esta familia se caracteriza por presentar flores pentámeras, con sépalos persistentes, frecuentemente acrescentes. El ovario es súpero, bilocular, raramente pluriocular y con varios óvulos por lóbulo (**Figura 1**) (Simpson 2010). La berenjena es una planta herbácea anual. Mide de 0.7 a 1.0 m de altura, con varias ramificaciones erectas, pilosas-espinosas. Hojas enteras, ovaladas, grandes (15 a 25 cm de largo) y muy pilosas en la cara abaxial. Las flores se presentan solitarias o en pequeños racimos, de tamaño mediano, con cáliz de 5 o más sépalos espinosos, con corola de 5 o más pétalos de color violáceo y con estambres que confinan el ovario que después de autofecundación dará origen al fruto o baya que constituye el órgano de consumo (González-Lavaut y col 2007).

Esta hortaliza es una baya carnosa de forma muy variable, la cual depende de la variedad de berenjena, aunque predominan las formas redondas, globosas y alargadas de colores morado oscuro, violeta, negro, amarillo o blanco (**Figura 2**). Por otra parte, la pulpa es carnosa, de coloración amarilla, blanca o verde. La estructura interna de la berenjena en estado inmaduro es comparable a la baya de tomate, pero en la medida que avanza la madurez, se hace difícil distinguir los diferentes tejidos, ya

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la berenjena

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	<i>Solanales</i>
Familia	<i>Solanaceae</i>
Subfamilia	<i>Solanoideae</i>
Tribu	<i>Solaneae</i>
Género	<i>Solanum</i>
Subgénero	<i>Leptostemonum</i>
Sección	<i>Melongena</i>
Especie	<i>Solanum melongena</i> L.

Fuente: D'Arcy (1975).

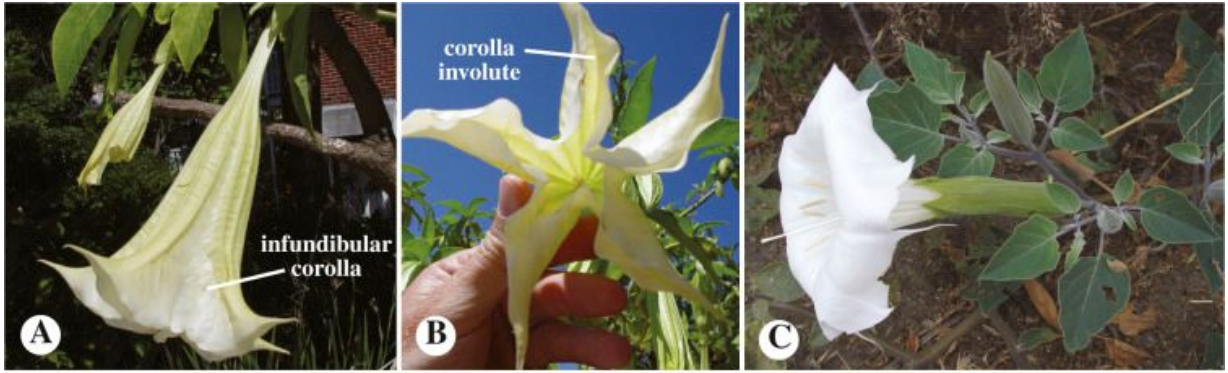


Figura 1. Flores de la familia *Solanaceae* (A), *Brugmansia* sp. (B), *Datura wrightii* (C).

Fuente: Simpson (2010).

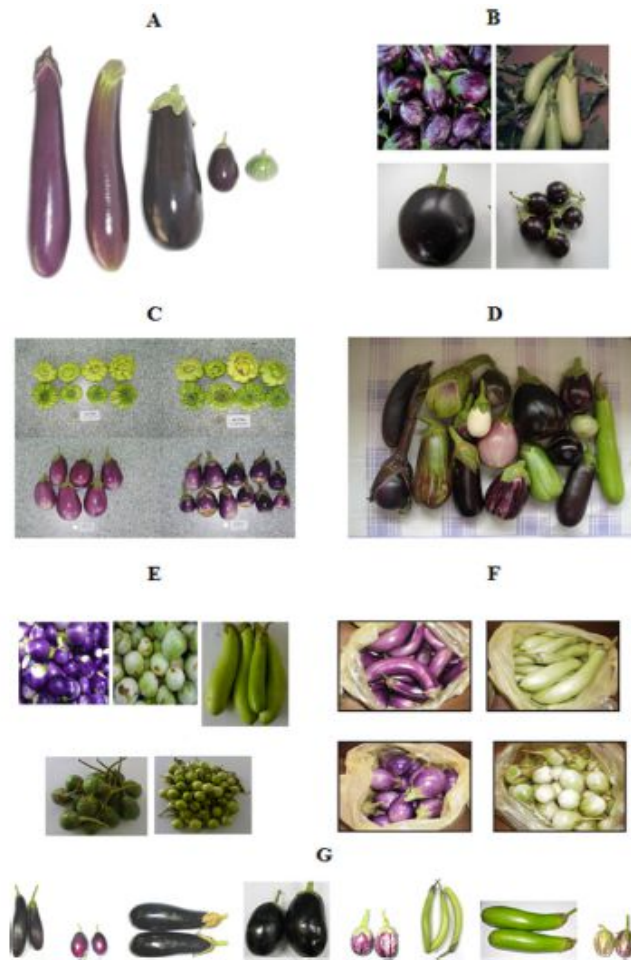


Figura 2. Variaciones en cultivares de berenjena.

- A. Berenjena China; filipina; americana; hindú; thai.
- B. Color morado de tamaño moderado; variedad verde; color morado tamaño grande; color morado tamaño pequeño
- C. Cuatro tipos de variedades de berenjena
- D. Variedades Scarlet (*S. aethiopicom*) y gboma (*S. macrocapon*).
- E. Purpura uniforme, tamaño moderado; blanco y verde, tamaño moderado; verde largo; rayado, verde, tamaño moderado; verde pálido, uniforme, tamaño pequeño.
- F. Berenjena china; berenjena Green Goddess; berenjena india; berenjena tailandesa.
- G. Pusa purple long; ravaiya; azad kranti; arka navneet; kalpatharu; raveena; anupam; silki.

Fuente: Niño-Medina y col (2017).

que las paredes del fruto se fusionan con tejido desarrollado a partir de la placenta, formando una sola masa de tejido parenquimatoso, en el cual se encuentran inmersas semillas pequeñas (2 mm), las cuales son aplastadas, de colores marrones y muy abundantes (González-Lavaut y col 2007). Asimismo, presenta un tamaño (3 a 35 cm de longitud) y peso variable (25 hasta 700 g) (Muy-Rangel y col 2002).

3. Composición química y nutricional

La berenjena tiene un importante valor nutricional ya que se ha reportado que es una fuente importante de compuestos bioactivos que han sido utilizados en la medicina tradicional para el tratamiento de enfermedades como asma, bronquitis y cólera, además de presentar beneficios para disminuir el colesterol sanguíneo (Kashyap y col 2003; Todaro y col 2009). Estos usos terapéuticos son atribuidos a su contenido alto de compuestos fenólicos, ya que estos compuestos son poderosos antioxidantes que contienen actividad tanto hepatoprotectivas como hipolipidémicas y otros efectos biológicos (Kaur y col 2014; Ferarsa y col 2018). En su mayoría se componen por flavonoides y ácidos fenólicos, particularmente ácido clorogénico en la pulpa (Stommel y col 2015) y antocianinas en la cáscara (Mennella y col 2012), siendo delphinidina y nasunina las más abundantes de estas últimas (Niño-Medina y col 2017).

Las antocianinas, al ser glucósidos de las antocianidinas y derivados de los flavonoides mediante la vía fenilpropanoide presentan un poder antioxidante alto, además de proporcionarle una coloración característica a los alimentos como es el caso de la berenjena (Mattioli y col 2020). Estas antocianinas aumentan el volumen antioxidante en suero y participan en la prevención de las enfermedades cardiovasculares e hiperlipidemias, disminuyendo de esta manera la oxidación del

colesterol LDL (lipoproteína de baja densidad). Además de estos beneficios, las antocianinas parecen contar con una parte vital para evitar el sobrepeso en los consumidores, ya que reduce los niveles de triglicéridos y colesterol sérico, aumentando así las lipoproteínas de alta densidad (HDL) (Naeem y Ugur 2020).

Asimismo, tiene un gran contenido de agua y una ligera cantidad de fibra concentrada en la cáscara y semillas, mientras que, su contenido de hidratos de carbono, proteínas y grasas es bajo, así como una discreta presencia de minerales y vitaminas, donde destacan el contenido de potasio, calcio, hierro y vitaminas del complejo B (**Cuadro 2**) (Moreiras y col 2013).

4. Producción e importancia económica

Para el año 2022 la producción mundial de berenjena fue de 57,378,561 toneladas (ton), siendo China el principal país productor con un aporte del 63.78% (36,597,224 ton), seguida por India (22.1% - 12,682,000 ton) y Egipto (2.23% - 1,278,350 ton) (**Cuadro 3**). Mientras que México ocupó el 18vo lugar con una producción de 113,964 toneladas lo que representó el 0.20% de la producción mundial total (FAOSTAT, 2023).

Para México el consumo de berenjena es mínimo; sin embargo, su exportación es significativa ya que destina dos terceras partes de su producción a países como Estados Unidos y Canadá, siendo Sinaloa el principal estado productor, ya que genera un 89.48% del total, lo que representa 101,974 ton, seguido por Nayarit y Yucatán, quienes producen apenas el 3.1% y 2.6%, respectivamente (**Cuadro 4**) (SAGARPA 2023).

Cuadro 2. Composición química de la berenjena

Componentes	Contenido por 100 g de fruto fresco
Energía (kcal)	25
Agua (g)	92.3
Lípidos totales (g)	0.18
Proteínas (g)	0.98
Hidratos de carbono (g)	5.88
Fibra (g)	3
Vitamina A: Eq. Retinol (μg)	1
Folatos (μg)	22
Riboflavina (mg)	0.037
Tiamina (mg)	0.039
Vitamina B ₆ (mg)	0.084
Vitamina C (mg)	2.20
Zinc (mg)	0.16
Hierro (mg)	0.23
Sodio (mg)	2
Calcio (mg)	9
Magnesio (mg)	14
Fósforo (mg)	24
Potasio (mg)	229

Fuente: USDA report 11209.

Cuadro 3. Principales países productores de berenjena en el año 2022

País	Producción (Tons)
China	36,597,224
India	12,682,000
Egipto	1,278,350
Turquía	835,422
Indonesia	618,201
Irán	595,335
Bangladesh	558,000
Italia	304,690
Japón	297,000
España	282,200
Filipinas	242,730
Siria	227,430
Irak	207,202
Uzbekistán	188,000
Argelia	178,416
Sri Lanka	141,881
Kazajistán	125,054
México	113,964
Total	56,618,843

Fuente: FAOSTAT (2023).

Cuadro 4. Principales estados productores de berenjena en México en el año 2022

Estado	Producción (Tons)
Sinaloa	101,974
Nayarit	3,542
Yucatán	2,934
Sonora	2,332
San Luis Potosí	2,265
Michoacán	310
Quintana Roo	259
Baja California Sur	147
Morelos	104
Puebla	98
Total	113,964

Fuete: SAGARPA (2023).

Para el año 2023, el intercambio comercial total (incluye compras y ventas internacionales) de berenjenas fue de \$93.6 millones de dólares. Para este mismo año, las entidades federativas de nuestro país con más ventas internacionales fueron Sinaloa (\$69.4 millones de dólares), Sonora (\$8.5 millones de dólares), Nayarit (\$8.02 millones de dólares), Yucatán (\$5.1 millones de dólares) y Baja California (\$1.14 millones de dólares). En cuanto a los principales destinos comerciales fueron Estados Unidos (\$91.2 millones de dólares), Canadá (\$648 mil dólares), Alemania (\$227 mil dólares), Países Bajos (\$44.5 mil dólares) y Suiza (\$3.31 mil dólares) (Gobierno de México, 2024).

B. MANEJO POSCOSECHA

La elección del momento de cosecha de la berenjena es una consideración importante que tendrá gran impacto en la vida poscosecha y comercial ya que es un fruto no climatérico, por lo que se cosecha cuando alcanza su tamaño y forma adecuado, así como la coloración deseada (FAO 1987).

Los frutos en su mayoría se cosechan y empacan directamente en el campo de manera individual con el propósito de reducir el daño mecánico y la exposición de la hortaliza a temperaturas inadecuadas que provoquen ablandamiento y oscurecimiento acelerado del tejido (Muy-Rangel y col 2002), además se reduce el desarrollo de microorganismos patógenos incrementando aún más su vida de anaquel (Iribarren y col 2011).

1. Ablandamiento del tejido

El ablandamiento es uno de los principales desordenes fisiológicos que complican la comercialización de la berenjena. Estudios previos han demostrado que el ablandamiento está directamente relacionado a desórdenes en la composición de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y pectinas) así como al incremento en la actividad de las enzimas degradadoras (PME, PG y β -Gal) (Díaz-Corona y col 2020).

Durante la maduración, los frutos pierden la firmeza generando ablandamiento en el tejido y a menos que el fruto se deshidrate las propiedades osmóticas de la célula y la presión de turgor se mantienen usualmente constantes. Mercer y Smittle (1992) describieron que el rompimiento del tejido incrementa la concentración de pectinas solubles en agua en frutos como el pepino. De acuerdo a Lazan y col (1995) dicho efecto es consecuencia de un incremento en la actividad de las enzimas degradadoras de la pared celular como PME, PG y β -Gal, que además provocan una disminución de las pectinas unidas iónica y covalentemente a la fase fibrilar (Amnuaysin y col 2012).

En este sentido, la función principal de la enzima PME es desmetilar los galacturonanos de la pared celular, convirtiendo las pectinas esterificadas a pectinas desesterificadas, las cuales sirven de sustrato para la enzima PG. Esta enzima cataliza la hidrólisis de enlaces glucosídicos α 1-4 en ácido galacturónico. Existen dos tipos, la endo-PG y la exo-PG. La endo-PG actúa hidrolizando de forma aleatoria enlaces glucosídicos internos α 1-4 de ácido poligalacturónico, resultando en la despolimerización de la molécula con la liberación de ácidos oligogalacturónicos. La exo-PG hidroliza enlaces glucosídicos α 1-4 de ácido poligalacturónico de los extremos no reductores liberando ácidos mono o digalacturónicos no saturados (Silva-Martins y

col 2013). Los cambios en la actividad de PG durante la maduración y ablandamiento han sido estudiados en muchos frutos. La actividad de PG es responsable de la solubilización y despolimerización de pectinas durante la maduración. La integridad de la lámina media, la cual controla las conexiones intercelulares, es afectada por la actividad de PG (Amnuaysin y col 2012). El patrón de expresión del gen de PG se correlaciona con la despolimerización de pectinas solubles en agua y con un aumento en su actividad enzimática para degradar pectina. Las PG son expresadas en un amplio rango de tejidos y estados de desarrollo en plantas y son codificadas por familias relativamente grandes de genes, en arabis se han identificado 52 genes (Hadfield y col 1998; Atkinson y col 2002).

La actividad de estas enzimas explica los cambios de textura que colectivamente contribuyen al ablandamiento del fruto, incrementando la susceptibilidad hacia el ataque por patógenos y finalmente al deterioro de la estructura celular (Carrillo-López y col 2002). Durante el desarrollo y maduración del fruto, la actividad de PME permite la desmetilación de la pectina generando grupos carboxilos desmetilados, los cuales pueden entrecruzarse con cationes divalentes como el calcio y refuerzan la red de pectinas en la pared celular (Brummell y col 2001; Voragen y col 2009). Por otra parte, diversos estudios han demostrado que la enzima β -GAL cataliza la hidrólisis de residuos terminales de galactosidasa a partir de carbohidratos, glucoproteínas y galactolípidos. Ha sido propuesto que la acción de β -GAL libera energía almacenada para crecimiento rápido, galactosidasa disponible durante el reciclaje metabólico de galactolípidos, glucoproteínas y componentes de la pared celular, y degrada compuestos de la pared celular durante la senescencia

incrementando la solubilidad y despolimerización de las pectinas de la pared celular (Pérez-Almeida y Carpita, 2006). Al respecto, Ketsa y col (1998) observaron que al aplicar un tratamiento hidrotérmico (38 °C por 3 días) en frutos de mango se incrementó la actividad de la β -GAL y la pérdida estructural del tejido dando como consecuencia no solo el ablandamiento del fruto sino el oscurecimiento del tejido.

2. Oscurecimiento en pulpa

En berenjena otro de los problemas que limita su vida de anaquel es el oscurecimiento enzimático, el cual es principalmente asociado a la pérdida de la integridad celular, así como a la senescencia de los frutos por lo que la aparición de compuestos oscuros, es síntoma de deterioro fisiológico (Altunkaya y Gokmen 2008). El proceso de oscurecimiento es uno de los fenómenos enzimáticos más indeseados en los productos hortofrutícolas, debido a que puede influenciar negativamente el valor nutritivo y funcional de dichos productos. Asimismo, se estima que más del 50% de las pérdidas poscosecha en el sector hortofrutícola se producen como resultado del oscurecimiento enzimático. Dichas pérdidas han llevado a un considerable interés en la comprensión y el control del mecanismo de acción de diversas enzimas (polifenol oxidasa (PPO), fenilalanina amonio liasa (FAL) y peroxidasa (POD)) en frutas y hortalizas, siendo una de las más señaladas la PPO (Mishra y col 2012).

El oscurecimiento enzimático de la pulpa en berenjena es causado por la acción de la enzima PPO que catalizan la conversión de ácidos fenólicos, almacenados en vacuolas, a quinonas las cuales reaccionan con el oxígeno para dar compuestos de color marrón (Mishra y col 2013; Kaushik y col 2017). La variación en la actividad de

PPO puede influir en el grado de oscurecimiento, el cual puede ser variable en la pulpa de la berenjena (Kaushik y col 2017).

El mecanismo de acción de PPO puede ser explicado por dos reacciones. En la primera la presencia de oxígeno y PPO provoca la hidroxilación de un monofenol y produce difenol, mientras que en la segunda reacción el difenol se convierte a quinonas mediante la remoción de una molécula de hidrógeno lo que lleva a la formación de estructuras coloreadas como las melanoidinas (**Figura 3**) (Diwakar y col 2015; Mishra y Gautam 2016). Generalmente, la enzima PPO está asociada con la integridad de los plástidos y la liberación de su sustrato (compuestos fenólicos) ubicado en las vacuolas, por lo que el oscurecimiento se presenta cuando las células son dañadas y se interrumpe la compartimentalización intracelular (Yingsanga y col 2008). Estos procesos pueden ser controlados por la actividad de enzimas como FAL productora de compuestos fenólicos y la reducción en la actividad de la POD. Esta última tiene el poder de oxidar mono y difenoles en presencia de pequeñas cantidades de peróxido de hidrogeno. Además, PPO y POD podrían estar actuando de manera sinérgica. Ya que, ha sido sugerido que PPO podría ser un promotor de la actividad de POD, ya que el peróxido de hidrogeno es generado durante la oxidación de los compuestos fenólicos en la reacción catalizada por PPO (López-López y col 2013).

3. Tratamientos poscosecha

Existen diversos tratamientos para prolongar y mantener la calidad de los productos hortofrutícolas (Báez y col 2001), uno de los tratamientos de mayor impacto para la vida poscosecha de dichos productos son el uso de aditivos como las sales de

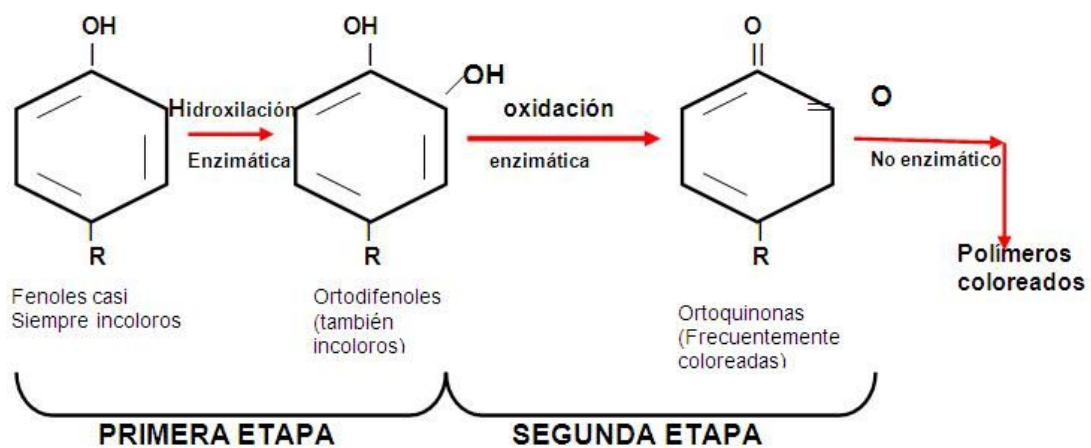


Figura 3. Esquema simplificado del proceso de oscurecimiento.

Fuente: Taranto y col (2017).

calcio y los tratamientos térmicos, los cuales son tratamientos físicos no contaminantes que se emplean para conservar la calidad en productos frescos y en algunos casos permiten reducir el desarrollo de algunas enfermedades en el fruto (Akbudak y col 2007).

Los efectos benéficos de los tratamientos poscosecha con sales de calcio se obtienen debido a que el calcio está involucrado en diversas funciones celulares que brindan a la célula mayor estabilidad y retrasa el ablandamiento de los frutos durante su desarrollo (Madani y col 2014). Asimismo, a las temperaturas altas se les podría atribuir el desarrollo de mecanismos de defensa por parte de los tejidos para controlar los desórdenes fisiológicos poscosecha. Fallik (2004) señaló que la exposición de los tejidos de las plantas a un estrés moderado puede activar mecanismos de respuesta que generan en el fruto una reducción en su deterioración.

a. Sales de calcio

El uso de aditivos como las sales de calcio permiten reducir desordenes fisiológicos como es el ablandamiento (Silveira y col 2011). Al respecto, Hewajulige y col (2003), reportaron que el calcio está involucrado en la permeabilidad selectiva de las células, división celular, consumo iónico y el ensamblaje de microtubulos y sobre todo en la regulación de la integridad de la membrana celular. Los iones de calcio cumplen la función de agentes reafirmantes al actuar sobre las cadenas de pectina de la lámina media para formar puentes entre éstas, aumentando así la fuerza de la pared celular (Rincón-Pérez y Martínez-Quintero 2015). Asimismo, el añadir calcio durante el proceso poscosecha en un fruto se ha relacionado con la conservación de su calidad y vida de anaquel, ya que el fruto absorbe el calcio exógeno y lo incorpora a su pared

celular (Madani y col 2014). Debido a la masa molar baja del calcio, sus iones pueden penetrar la pared celular mediante transporte pasivo, permitiendo una difusión rápida y eficaz (Silveira y col 2011). Las pectinas de la pared celular, formadas por cadenas de ácidos poligalacturónicos, forman espacios adecuados para que los iones de calcio se unan a ellas (Conway y col 1987), por lo que una vez realizada la difusión del calcio a la pared celular, los cationes son atraídos por los grupos carboxilos libres (con carga negativa) de las cadenas de pectinas de la lámina media y pared celular llevándose a cabo la formación de pectatos de calcio y por lo tanto el “modelo caja de huevo” (**Figura 4**) lo que conlleva a un efecto reafirmante en el fruto, reduciendo el acceso de enzimas patógenas (Mahmud y col 2008).

Los iones calcio se pueden difundir pasivamente dentro de la estructura de la pared celular debido a que la porosidad es aproximadamente de 3.5 a 9.2 nm, mientras que el tamaño de los iones calcio son cerca de 0.1 nm. Cuando el fruto es sumergido en una solución de sales de calcio, los iones son transportados principalmente a través del apoplasto o espacios intercelulares, donde el primer efecto en la firmeza se debe a que son atraídos por los grupos carboxilo cargados negativamente en el homogalacturonano (HG) que constituye la pectina en la lámina media y la pared celular. Mientras que el siguiente efecto reafirmante durante el almacenamiento puede ser debido a la interacción de los iones calcio con los grupos de cabeza de los fosfolípidos de la membrana plasmática y proteínas cargadas negativamente, contribuyendo a un incremento en la integridad de la membrana y retención de la presión de turgencia de la célula, lo cual reduce las oportunidades para la degradación por enzimas lipolíticas (Ngamchuachit y col 2014).

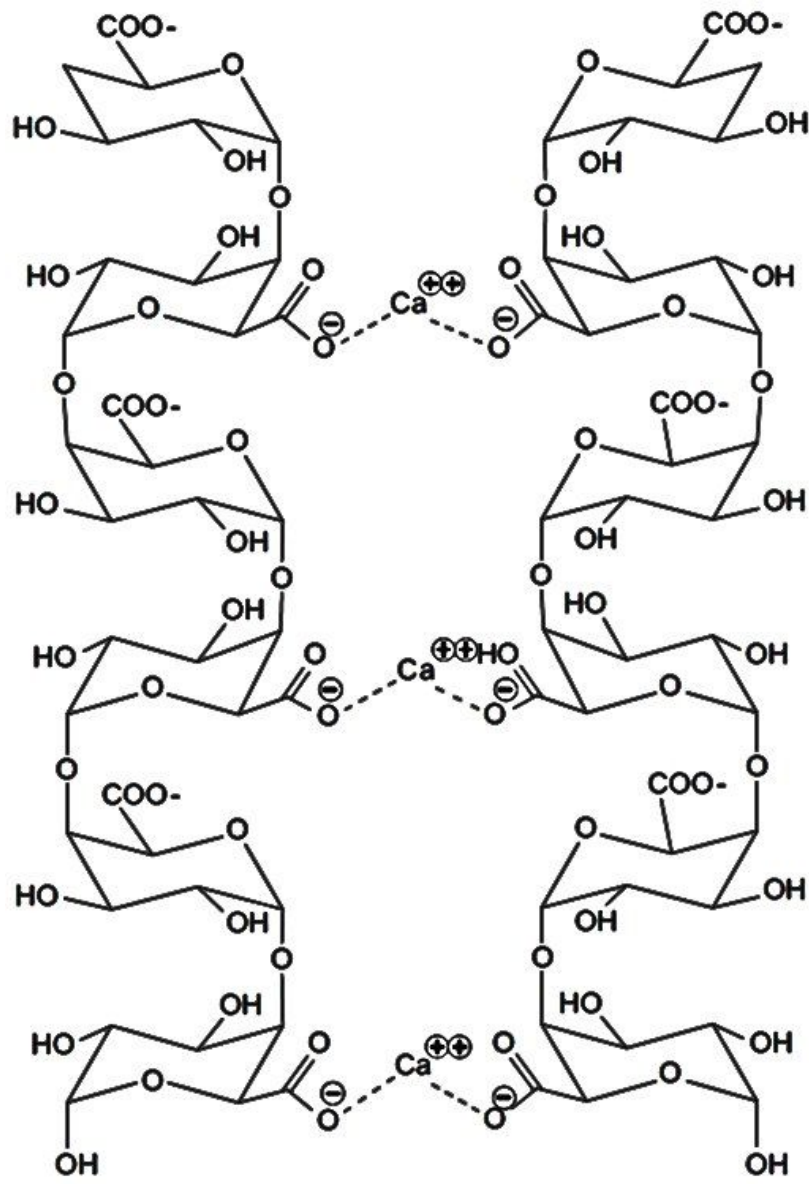


Figura 4. Modelo caja de huevo en la gelificación inducida por Ca²⁺.

Fuente: Caffall y Mohnen (2009).

Los homogalacturonanos son altamente metilesterificados cuando son depositados en la pared celular. PME puede desmetilesterificar HGs en forma de bloques, lo cual da lugar a varios residuos consecutivos de ácido galacturónico (AGal) sin grupos éster metílicos. Estas cadenas de HGs están cargadas negativamente y, por lo tanto, pueden formar enlaces cruzados con cationes como los iones de calcio, lo que da lugar a las llamadas estructuras de "caja de huevos", las cuales son responsables de la formación de gel. Por otro lado, PME puede desmetilesterificar residuos únicos de AGal, lo que lleva a un patrón de metilesterificación aleatorio. Los HGs poco metilesterificada se despolimerizan mediante enzimas que degradan la pectina, como las poligalacturonasas y por pectato liasas (PL), lo que conduce a la formación de oligogalacturónidos (OG). La actividad de PME es inhibida por su inhibidor proteico PMEI (**Figura 5**) (Wormit y Usadel 2018).

En el estudio realizado por Barbagallo y col (2012) observaron que al aplicar ascorbato y citrato de calcio (0.15 g/L) en berenjena se observó una reducción en la actividad de las enzimas degradadoras (PME, PG y β -GAL) de pared celular, así como una reducción del oscurecimiento de la pulpa, especialmente para las tratadas con ascorbato de calcio.

a. Tratamiento hidrotérmico

Un tratamiento hidrotérmico consiste en sumergir los productos hortofrutícolas en agua caliente por tiempos cortos y temperaturas moderadas (Lurie 1998; Porat y col 2000), ya que el agua es un medio de transferencia de calor muy eficiente y permite generar cambios metabólicos benéficos para el fruto una vez que se almacena a temperaturas de refrigeración (Fallik 2004).

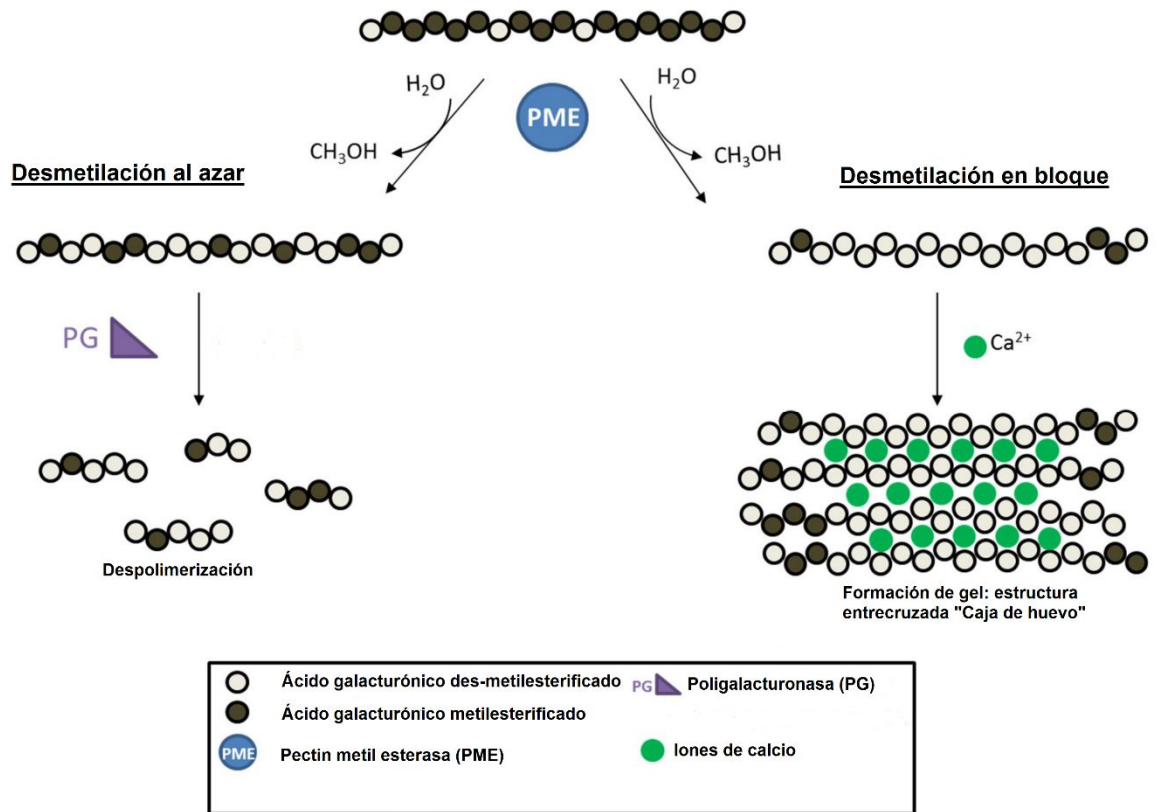


Figura 5. Diagrama esquemático de los procesos de desmetilación al azar y en bloque, gracias a la adhesión de iones de calcio.

Fuente: Wormit y Usadel (2018).

Estudios previos han demostrado que el uso de un TH ha permitido la reducción del oscurecimiento enzimático en lechuga (Martin-Diana y col 2005), níspero (Rui y col 2010), kiwi (Ma y col 2014), pepino (Nasef, 2018), entre otros. Laurie (1998) menciona algunas teorías para justificar la eficacia de este tratamiento, las cuales están basadas en la inducción de la síntesis de proteínas chaperonas (SPC), así como un aumento en el índice de desaturación de los lípidos de membrana, lo que induce a una mayor fluidez de las mismas y una menor pérdida de electrolitos, un aumento de los niveles de poliaminas y un incremento de la actividad del sistema antioxidante (González-Aguilar y col 2000; Mirdehghan y col 2007; Ghasemnezhad y col 2008). Asimismo, otros autores mencionan que el calor aplicado en frutos ocasiona cambios en la acción de enzimas degradadoras de pared celular que podrían resultar positivos, debido a cambios en la expresión de genes y la síntesis de proteínas (Paull y Chen 2000), así como la activación de enzimas antioxidantes como catalasa (Boonkorn 2016).

En referencia a los cambios metabólicos que genera el TH, algunos autores mencionan que este tratamiento es causante de un incremento de aproximadamente el 25% del contenido de compuestos fenólicos en mango ya que son sintetizados en respuesta a un estrés (El-Samahy y col 2000; Niño-Medina y col 2017). También se ha mencionado que la aplicación de un TH (50 °C, 1 min) en lechuga ha logrado inhibir la actividad de las enzimas POD y PPO, limitando así la oxidación de los compuestos fenólicos en el fruto y por lo tanto la aparición de zonas oscuras (Martin-Diana y col 2005). En el estudio realizado por González-Aguilar y col (2000) se observó que al aplicar un TH en pimientos a 53 °C por 4 min redujo la susceptibilidad a las temperaturas bajas y a la pérdida de calidad que incluyen el ablandamiento y retraso

en la pudrición del fruto. En el estudio realizado por Zhang y col (2012) en mango tratado hidrotérmicamente observaron que la actividad de PME fue más baja en aquellos frutos a los que se les aplicó TH (55 °C,10 min), pero la actividad de PG incrementó para posteriormente disminuir gradualmente provocando una pérdida rápida de la integridad celular. Aguayo y col (2008) demostraron que al sumergir trozos de melón amarillo en sales de calcio por 1 min a 60 °C se incrementó la concentración de calcio en un 50%, reduciendo el ablandamiento del fruto y el crecimiento microbiano. Por lo tanto, la aplicación de sales de calcio en combinación con un TH es una buena alternativa para extender la vida de anaquel y mejorar la calidad de diversas frutas y hortalizas.

Sin embargo, estudios sobre el efecto del TH en berenjena no han sido reportados previamente, por lo que se desconoce el tiempo y temperatura necesarios para reducir el oscurecimiento enzimático, así como los cambios en la estructura celular que provoca el ablandamiento del fruto. Por lo que, es de gran interés evaluar el efecto de dicho tratamiento en combinación con ascorbato de calcio para activar los mecanismos de respuesta en relación a parámetros de calidad, activación de enzimas degradadoras de pared celular, cambios micro estructurales, contenido de calcio, inactivación de enzimas oxidativas y contenido de compuestos fenólicos.

IV. JUSTIFICACIÓN

La berenjena es una hortaliza de poca demanda en el mercado mexicano; no obstante, es de gran importancia económica ya que su exportación a otros países se da de manera significativa, siendo el estado de Sinaloa el principal estado productor a nivel nacional, con más del 94% del total de producción de berenjena. Para el almacenamiento y la distribución de esta hortaliza se recomiendan temperaturas entre los 10 y 12 °C, de esta manera el fruto se puede mantener en óptimas condiciones hasta por 7 días. Pero al ser un producto destinado principalmente a exportación, se requiere un mayor tiempo para su transporte y comercialización en países distantes. Además, debido a que la berenjena es altamente susceptible a daños mecánicos, ataques de plagas, oscurecimiento y ablandamiento durante su almacenamiento surge la importancia de la aplicación de un tratamiento que sea capaz de retrasar la aparición de estos desórdenes. Con el tiempo se han implementado una serie de estrategias en diferentes frutos, siendo las sales de calcio una alternativa ampliamente utilizada para retrasar la pérdida de la calidad especialmente en la firmeza en los productos hortofrutícolas, cuya aplicación ha sido potencializada por el uso de un TH cuando se aplican previo al almacenamiento. A su vez, es importante mencionar que el estrés provocado por las temperaturas altas también puede inducir la activación de enzimas degradadoras de pared celular como PME, PG y β -Gal.

No obstante, no se ha reportado el efecto que tiene la aplicación de un tratamiento hidrotérmico en combinación con sal de calcio sobre los frutos de berenjena y como éstos podrían afectar la actividad de enzimas oxidativas como PPO.

Por lo tanto, este trabajo propone el uso de un tratamiento hidrotérmico en combinación con ascorbato de calcio como una alternativa para mantener la calidad y alargar la vida de anaquel de la berenjena, reduciendo de esta manera el oscurecimiento enzimático y los cambios en la estructura celular.

V. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de un tratamiento hidrotérmico-ascorbato de calcio sobre la actividad de enzimas responsables de la degradación de pared celular y oscurecimiento enzimático, así como el contenido de compuestos fenólicos y cambios micro estructurales en berenjena almacenada a temperatura comercial.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la combinación de temperatura-tiempo del tratamiento hidrotérmico óptimo (THO) que incremente la actividad de PME, mantenga la firmeza, color y contenido de antocianinas en frutos de berenjena aplicando metodología de superficie de respuesta.
2. Determinar la mejor combinación de THO-ascorbato de calcio que mantenga la firmeza en frutos de berenjena.
3. Evaluar parámetros de calidad (índice de oscurecimiento, pérdida de peso y firmeza) en frutos de berenjena tratados con THO, ascorbato de calcio y la combinación durante su almacenamiento a temperatura comercial.
4. Determinar la actividad de las enzimas degradadoras de pared celular (PME, PG, β -GAL) en frutos de berenjena tratados con THO, ascorbato de calcio y la combinación durante su almacenamiento.
5. Evaluar el contenido de calcio en el tejido de berenjena sometido a un THO, ascorbato de calcio y la combinación durante su almacenamiento comercial.

6. Evaluar por medio de microscopía óptica el efecto de la aplicación de un THO, ascorbato de calcio y su combinación sobre la estructura de la pared celular en frutos de berenjena almacenados a temperatura comercial.
7. Evaluar la actividad de las enzimas relacionadas con el oscurecimiento enzimático (PPO y POD) en frutos de berenjena tratados con THO, ascorbato de calcio y la combinación.
8. Determinar los cambios en el contenido de compuestos fenólicos, antocianinas y ácido clorogénico en berenjena tratada con THO, ascorbato de calcio y la combinación de estos durante el almacenamiento a temperatura comercial.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

A. MATERIALES

1. Obtención de la materia prima

Las berenjenas fueron obtenidas de un campo agrícola ubicado en El Dorado Sinaloa, México. Se realizó una preselección de las hortalizas en el campo agrícola con base en tamaño y forma. Los frutos fueron llevados al laboratorio de Fisiología y Tecnología Poscosecha del Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas, donde se lavaron con jabón y se sumergieron en hipoclorito de sodio con una concentración de 0.60 mL/L por 3 min. Después se hizo una segunda selección de la fruta para descartar aquellos frutos que presentaban algún defecto o daño.

B. MÉTODOS

1. Diseño experimental

Este estudio fue dividido en dos partes: en la primera se realizó un proceso de optimización, donde se aplicaron diferentes temperaturas y tiempos, para obtener un THO, donde se evaluaron cuatro respuestas (actividad de PME, contenido de antocianinas, ΔE y firmeza); mientras que, en la segunda parte, se evaluó la calidad y actividad enzimática y compuestos fenólicos en el tratamiento THO, AscCa y la combinación.

2. Proceso de optimización

a. Modelo de respuesta

Para este experimento, el efecto de un tratamiento hidrotérmico fue evaluado y modelado en función de la actividad de la enzima PME, diferencia de color (ΔE),

firmeza y contenido de antocianinas en frutos de berenjena, mediante el uso de la metodología de superficie de respuesta y un diseño central compuesto (DCC). El número total de experimentos (N) del DCC fue determinado utilizando la siguiente ecuación:

$$N = 2^k + 2k + N_0$$

Donde k corresponde a el número de variables estudiadas, en el caso de este estudio fueron la temperatura (T) y el tiempo (t) (k=2). Mientras 2^k , 2k y N_0 son los puntos de corrida cúbico, axial y central, respectivamente. Cada variable fue examinada en cinco niveles diferentes (- α , -1, 0, 1, and + α), los cuales se muestran en el **Cuadro 5**. La selección de los niveles independientes fue determinado basado en revisión de la literatura (tomate Cherry (Yang y col 2009); pepino (Zhang y col 2014); tomate (Salazar-Salas y col 2017)) y en ensayos preliminares. Un total de 13 tratamientos fueron conducidos (**Cuadro 6**).

Se supuso que existía una función matemática entre las respuestas estudiadas de acuerdo a ambas variables relacionadas con el procesamiento del TH dadas en la siguiente ecuación:

$$Y = f(T, t)$$

Al utilizarse un modelo de segundo orden con dos factores para predecir el comportamiento experimental de cada respuesta, se utilizó la siguiente ecuación:

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_1^2X_1^2 + b_2^2X_2^2 + b_1b_2X_1X_2$$

Cuadro 5. Factores y niveles de las variables del proceso empleadas en el diseño experimental ($\alpha= 1.414$).

Niveles de variación					
FACTORES	- α	-1	0	1	+ α
T (°C)	25.86	30.00	40.00	50.00	54.14
t (min)	2.93	5.00	10.00	15.00	17.07

T= temperatura; t= tiempo

Cuadro 6. Diseño experimental empleado para obtener diferentes combinaciones de temperatura y tiempo.

Tratamiento	Variables independientes			
	Codificadas		Decodificadas	
	X1	X2	T (°C)	t (min)
1	-1	-1	30.00	5.00
2	1	-1	50.00	5.00
3	-1	1	30.00	15.00
4	1	1	50.00	15.00
5	- α	0	25.86	10.00
6	+ α	0	54.14	10.00
7	0	- α	40.00	2.93
8	0	+ α	40.00	17.07
9	0	0	40.00	10.00
10	0	0	40.00	10.00
11	0	0	40.00	10.00
12	0	0	40.00	10.00
13	0	0	40.00	10.00

T (°C) = temperatura; t (min)= tiempo

Donde Y_i es la respuesta genérica, X_1 es la temperatura, X_2 es el tiempo y b_0 , b_1 , b_2 , b_1^2 , b_2^2 son los coeficientes de regresión. Los datos experimentales fueron analizados mediante la metodología de superficie de respuesta, usando el paquete estadístico Desing-Expert versión 7.0 (Stat-Ease, 2005, Inc., Minneapolis, MN, EUA). Se eligieron las metas deseadas para cada variable y respuesta. Todas las variables independientes se mantuvieron dentro de sus respectivos rangos mientras las respuestas fueron maximizadas.

b. Respuestas

1) Actividad de Pectinmetilesterasa (PME)

Las enzimas de la pared celular fueron extraídas de acuerdo a la metodología reportada por Díaz-Corona y col (2020) con algunas modificaciones. Se mezclaron 10 g de pulpa de berenjena con 12.5 mL de NaCl 1 M (4 °C por 1 min) utilizando un homogenizador Ultra Turrax (T18 basic, IKA Works, Inc. Wilmington, NC, EUA). El homogenizado se centrifugó a 17,000 g por 45 min a 4 °C y se filtró con papel Whatman No. 4. El sobrenadante se saturó al 80% con sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄) y se colocó en agitación por 1 hora bajo refrigeración para precipitar la proteína, seguido de una segunda centrifugación a 17,000 g por 20 min. El precipitado con el contenido de la proteína se re-suspendió en 15 mL de agua destilada a 4 °C y se usó para medir la actividad enzimática de PME.

La actividad de PME se determinó de acuerdo a lo reportado por Díaz-Corona y col (2020). Debido a la hidrolización de los enlaces éster de la pectina, se producen ácidos y el pH sufre una disminución, lo que causa que el indicador cambie de color.

Este cambio fue constantemente monitoreado (cada minuto por cinco minutos) con un espectrofotómetro (Espectrofotómetro, UNICO SQ 2800, New Jersey, EUA). Se mezclaron 2 mL de pectina cítrica (0.5%) con 0.5 mL de azul de bromotimol (0.01%) en amortiguador de fosfato de potasio (0.003 M) y 4 mL de agua destilada. La mezcla se ajustó a un pH de 7.5 y se inició la reacción al añadir 100 µL del extracto enzimático de PME. La reacción se llevó a cabo a 30 °C y fue monitoreada durante 5 min a 620 nm. Se utilizó una curva estándar de ácido galacturónico (0.5%). Los resultados fueron expresados como unidades por gramo de fruto fresco (ff) (U/g ff). Se obtuvieron cuatro lecturas por réplica de tres frutos por tratamiento.

2) Diferencia total de color (ΔE)

Este parámetro se determinó utilizando un colorímetro (Minolta CR-200 Chroma meter, Osaka, Japón) y se registraron las variables L^* (luminosidad), a^* (tonalidad verde-roja) y b^* (tonalidad azul-amarilla). Además, para evaluar mejor el cambio de color general entre las muestras durante el almacenamiento, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta E = ((L_{\text{inicial}} - L_{\text{final}})^2 + (a_{\text{inicial}} - a_{\text{final}})^2 + (b_{\text{inicial}} - b_{\text{final}})^2)^{0.5}.$$

Las variables del color fueron medidas en seis puntos diferentes de las berenjenas por muestra.

3) Firmeza

Se determinó de acuerdo con lo reportado por Barbagallo y col (2012) con algunas modificaciones. Se cortó por la mitad el fruto de manera longitudinal y se eliminó la cáscara de la porción central del corte y se colocó la punta en tres partes

(centro y extremos), obteniéndose 6 puntos por fruto. Se utilizó un penetrómetro (Chatillon DFE100, AMETEK Inc, Largo, FL) equipado con una punta plana de 11 mm de diámetro a una velocidad de penetración constante (50 mm/min-5 mm de penetración). Los resultados fueron reportados como Newtons (N).

4) Contenido de antocianinas

Las antocianinas fueron extraídas de la cáscara de las berenjenas de acuerdo a Abdel-Aal y col (1999). Los extractos de antocianinas se prepararon con 0.1 g de fruto liofilizado y etanol frío acidificado (95% metanol y HCl 1 N, 85:15, v/v). Después de eso, la muestra se centrifugó (Modelo 5415D; Eppendorf AG, Hamburgo, Alemania) a 3000 g durante 10 min y se recogió el sobrenadante. La absorbancia de la muestra se midió inmediatamente a 520 nm en un lector de microplacas (Modelo xMark TM; Bio-Rad, CA, EUA). El contenido total de antocianinas por muestra (mg/kg de peso fresco) se calculó como equivalentes de cianidina-3-glucósido utilizando la siguiente ecuación:

$$C=(A/\epsilon) \times (\text{vol}/1,000) \times \text{PM} \times (1/\text{peso molar})$$

Donde C es la concentración total de antocianinas (mg/kg), A es la lectura de absorbancia, ϵ es la absortividad molar (cianidina-3-glucósido = 25,965 cm⁻¹ M⁻¹), vol es el volumen total de extracto de antocianina y PM es el peso molar de cianidina-3-glucósido (449.2 g).

3. Uso de condiciones óptimas del THO, AscCa y su combinación (TH-AscCa)

a. Metodología

Una vez obtenidos las condiciones óptimas de temperatura y tiempo para activar PME se procedió a aplicar en los frutos de berenjena con la combinación de ascorbato de calcio (1%), por medio de inmersión a 40 °C por 15 min, donde se obtuvieron cuatro tratamientos (control, TH, AscCa y TH-AscCa). Los frutos tratados fueron almacenados durante 25 días a una temperatura de 15 °C, humedad relativa del 95%, y se realizaron retiros cada 5 días para los análisis correspondientes.

4. Parámetros de calidad

a Índice de oscurecimiento (IO)

El IO se evaluó visualmente de acuerdo a la metodología propuesta por Buera y col (1985) con algunas modificaciones utilizando una escala hedónica de seis puntos, donde 0= ninguna señal de oscurecimiento, 1= ≤10% de oscurecimiento en pulpa, 2= 11-25% oscurecimiento en pulpa, 3= 26-40% de oscurecimiento en pulpa; 4= 41-50% oscurecimiento en pulpa, 5= ≥51% de oscurecimiento. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$IO = \frac{\sum (Nivel\ de\ oscurecimiento \times\ número\ de\ frutas\ en\ cada\ nivel)}{total\ de\ frutas\ en\ el\ tratamiento}$$

b Porcentaje de pérdida de peso (%PP)

Para la determinación de la pérdida de peso de las berenjenas se registró el peso cada 2 días, utilizando una balanza analítica (Sartorius TE-4101) de acuerdo a lo

reportado por Carrera y col (2009) y se calculó el porcentaje de pérdida de peso mediante la siguiente fórmula:

$$\%PP = \frac{\text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

c Firmeza

La firmeza fue determinada como se reportó previamente en la sección del proceso de optimización.

5. Determinación de la actividad de enzimas de la pared celular en respuesta al estrés abiótico

a Preparación del extracto enzimático

Las enzimas de la pared celular fueron extraídas de acuerdo a lo descrito previamente en la sección de optimización.

b Evaluación de la actividad de PME

La actividad de PME se determinó de acuerdo a lo descrito en la sección del proceso de optimización.

c Evaluación de la actividad de PG

Se determinó la actividad específica de PG de acuerdo con la metodología reportada por Chávez-Sánchez y col (2013), en la que se evaluó la formación de grupos reductores del ácido poligalacturónico.

Se mezclaron 2 mL del extracto enzimático y 2 mL de ácido poligalacturónico (0.5%) en amortiguador de acetato de sodio (pH 4.6) y se incubaron por 1 h a 37 °C. La medición de la actividad se realizó mezclando 400 µL del extracto incubado, 4 mL

de amortiguador de tetraborato de sodio 0.1 M (pH 9) y 400 μ L de 2-cianoacetamida al 1%. Esta mezcla se agitó y se calentó en baño maría a temperatura de ebullición durante 10 min, posteriormente se enfrió a temperatura ambiente y se registró el cambio de absorbancia a una longitud de onda de 276 nm. El blanco se preparó de la misma manera, pero sin agregar el extracto enzimático. La curva estándar se construyó con ácido galacturónico (0.5%). La actividad de la PG se reportó como μ moles de ácido galacturónico formado por hora sobre la base de 100 g de fruto fresco (100 g/ff). Se obtuvieron cuatro lecturas por réplica.

d Evaluación de la actividad de β -GAL

La actividad de β -GAL se llevó a cabo de acuerdo con lo reportado por Hossain y col (2014) con algunas modificaciones, determinando la actividad enzimática a partir de la estimación de la liberación de *p*-nitrofenol. Se utilizaron 50 μ L del sustrato (*p*-nitrofenil- β -D-galactopiranosido), posteriormente se mezcló en tubos de ensayo con 100 μ L de amortiguador de fosfato (pH 6.0). Se añadieron 50 μ L de extracto crudo a cada tubo y fueron incubados a 37 °C por 1 h. Para detener la reacción, se añadieron 1.3 mL de amortiguador glicina-NaOH (pH 10.5) a cada tubo. La cantidad liberada de *p*-nitrofenol por parte de los sustratos fue medida espectrofotométricamente (Espectrofotómetro, UNICO S2150UV, UV Visible) a una absorbancia de 420 nm. Una unidad de actividad enzimática fue definida como la cantidad de enzima requerida para liberar 1 nmol de *p*-nitrofenol por minuto a 37 °C.

6. Contenido de calcio

El análisis de calcio fue llevado a cabo de acuerdo a lo reportado por Fraeye y col (2009). Muestras homogenizadas de berenjena fueron secadas a 105 °C. Un gramo de la muestra seca fue calcinado en un horno de mufla a 550 °C durante 4 h. El residuo fue transferido a una solución de 1 N de ácido nítrico (HNO₃) y fue incubado a 70 °C por 1 h. El volumen fue ajustado a 100 mL. La concentración de calcio fue evaluada usando un espectrofotómetro de absorción atómica modelo 3110 (Perkin Elmer Inc., EUA). Los resultados fueron expresados como mg g⁻¹ muestra seca.

7. Determinación del daño en la estructura celular

a. Microscopía óptica

La preparación de las muestras para su observación en el microscopio óptico se realizó utilizando la metodología reportada por Phothiset y Charoenrein (2013) con algunas modificaciones. Se realizaron cortes de la cáscara de berenjena de 1 cm x 1 cm aproximadamente a los 0 y 20 días y se fijaron empleando 8 mL de una solución fijadora FAA (formaldehído, alcohol, acético) por 48 h, la cual contenía 50% de etanol absoluto, 5% de ácido acético glacial, 10% de formaldehído y 35% de agua destilada. Posteriormente, las muestras se deshidrataron mediante cambios en concentraciones de etanol al 50%, 70%, 96% y 100%, después fueron transferidas a una solución de etanol absoluto y xileno (1:1), seguido de tres cambios en xileno al 100%. En cada uno de los cambios se mantuvo la muestra en agitación por 5 h. Enseguida, las muestras se infiltraron en parafina grado histológico a 60-63 °C por 24 h haciendo dos cambios cada 12 h. Se realizó una inclusión en parafina en moldes que se colocaron en

refrigeración por 2 h y posteriormente se obtuvieron cortes histológicos de 10 μm de grosor con ayuda de un microtomo (Microtomo rotatorio manual YD-202). Los cortes se colocaron en un baño de flotación con agua caliente (43 °C) más grenetina (1 g/L) y se recuperaron en portaobjetos a los cuales se les retiró el exceso de parafina en una estufa a 62 °C por 5 min seguido de 3 cambios de xileno (3 min cada uno). Para la tinción, las muestras se sumergieron en una solución con safranina al 1% y etanol al 50% por 24 h, posteriormente se deshidrataron en una serie gradual de etanol al 50%, 70% y 96% (3 min en cada uno), seguido de una tinción con verde rápido al 0.1% por 3 min y se lavó con etanol al 96% y tres cambios de xileno (3 min en cada uno). Finalmente, las muestras fueron fijadas utilizando acrílico y protegidas con un cubreobjetos, para ser observadas en un microscopio óptico binocular “Primo Star” con iluminación led y halógena marca Carl Zeiss, las imágenes fueron digitalizadas utilizando la cámara del microscopio anexada al programa Zen 2 Blue Edition.

8. Evaluación de las enzimas relacionadas con la aparición del oscurecimiento enzimático

a. Polifenol oxidasa (PPO)

Los extractos enzimáticos fueron obtenidos homogenizando 5 g de muestras de berenjena, a los que se les agregó 5 mL de amortiguador de K_2HPO_4 (0.05 M) a un pH de 7.0 que contenía 40 g/L polivinilpolipirrolidona (PVPP) para después ser centrifugados a 14,000 g por 1 min (4 °C); el supernadante fue dializado contra dos cambios del mismo amortiguador en un periodo de 24 h a 4 °C. La actividad de PPO fue determinada de acuerdo a lo reportado por López-López y col (2013). La reacción fue iniciada al agregar 900 μL de amortiguador de K_2HPO_4 (0.05 M, pH 7.0) más 500

μL de 0.2 M de catecol en amortiguador de citrato de sodio (0.1 M, pH 4.0) y 100 μL del extracto enzimático en una celda de cuarzo. Se midieron los cambios en la absorbancia a una longitud de onda de 400 nm cada 10 s durante 2 min usando un espectrofotómetro (UNICO SQ 2800, NJ, EUA). Una unidad de actividad (UA) fue definida como el cambio en la absorbancia de 0.001 unidades/min.

b. Peroxidasa (POD)

Se homogeneizaron 10 g de rodajas de berenjena con 20 mL de amortiguador K_2HPO_4 0.05 M (pH 7,0) el cual contenía 100 g/L de PVPP, esto de acuerdo con lo reportado por López-López y col (2013). La mezcla se homogeneizó durante 1 min y se dejó reposar durante 2 h en oscuridad a 4 °C, luego se filtró y se centrifugó a 11,000 g durante 25 min a 4°C (Eppendorf 5804-R, Hamburgo, Alemania). El sobrenadante se saturó al 70% con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y se centrifugó nuevamente. El sedimento se disolvió en 20 mL de amortiguador de Na_2HPO_4 0.05 M (pH 7.0) y se dializó frente a dos cambios del mismo amortiguador durante un período de 24 h a 4°C. La actividad de POD se analizó espectrofotométricamente añadiendo 2700 μL de amortiguador de Na_2HPO_4 (0.2 M, pH 6.5), 100 μL de H_2O_2 (10 g/L), 150 μL de guayacol (40 g/L) y 150 μL de extracto enzimático. Se midieron los cambios en la absorbancia a 470 nm cada 10 s durante 2 min. Una unidad de actividad (UA) se definió como el cambio en la absorbancia de 0.001 unidades/min.

9. Presencia de compuestos bioactivos

a Compuestos fenólicos totales

Para la identificación de los compuestos fenólicos totales se obtuvo un extracto metanólico (EM) de acuerdo a lo reportado por López-Ángulo y col (2016). Para la

identificación de los compuestos fenólicos se realizó una cromatografía líquido-líquido. El EM fue suspendido en metanol al 90% (v/v) para ser fraccionado con hexano (3 x 4 mL). La fracción de hexano se desechó, se tomó el EM desengrasado y se guardó en frascos ámbar para posterior derivatización, el resto del extracto fue concentrado y re-suspendido en agua destilada y posteriormente se fraccionó con acetato de etilo (3 x 4 mL). Las fracciones de acetato de etilo fueron mezcladas y concentradas para finalmente ser guardadas a -20 °C hasta su uso.

Se llevó a cabo un análisis por cromatografía de gases acoplado a espectrómetro de masas (GC-MS) de las muestras derivatizadas según lo reportado por Wang y Zuo (2011). La identificación de los componentes se llevó a cabo con la biblioteca de masa espectral (NIST08.LIB). El porcentaje relativo de cada componente se calculó comparando su área de pico promedio con las áreas totales.

Para el análisis de HPLC acoplado a espectrómetro de masas (LC-MS) la separación cromatográfica se llevó a cabo según lo reportado por Jeong y col (2011). Se utilizó un detector UV-VIS a tres longitudes de onda (270, 320 y 350 nm). La identificación se llevó a cabo por medio de un estándar externo.

b Antocianinas totales

Las antocianinas fueron extraídas de la cáscara de las berenjenas de acuerdo a Abdel-Aal y col (1999). Los extractos de antocianinas se prepararon con 0.1 g de fruto liofilizado y etanol frío acidificado (95% metanol y HCl 1 N, 85:15, v/v). Después de eso, la muestra se centrifugó (Modelo 5415D; Eppendorf AG, Hamburgo, Alemania) a 3000 g durante 10 min y se recogió el sobrenadante. La absorbancia de la muestra

se midió inmediatamente a 520 nm en un lector de microplacas (Modelo xMark TM; Bio-Rad, CA, EUA). El contenido total de antocianinas por muestra (mg/kg de peso fresco) se calculó como equivalentes de cianidina-3-glucósido utilizando la siguiente ecuación:

$$C=(A/\epsilon) \times (vol/1,000) \times PM \times (1/peso \text{ de la muestra})$$

Donde *C* es la concentración total de antocianinas (mg/kg), *A* es la lectura de absorbancia, ϵ es la absortividad molar (cianidina-3-glucósido = 25,965 cm⁻¹ M⁻¹), *vol* es el volumen total de extracto de antocianina y *PM* es el peso molar de cianidina-3-glucósido (449.2 g).

c Ácido clorogénico

Se determinó el contenido de ácido clorogénico (CAC) según lo reportado por López-Angulo y col (2018), el EM (50 mg) se disolvió en 5 mL de H₂O:MeOH (9:1 v/v) y se particionó con acetato de etilo (5 mL/3 veces), esta fase se llevó a sequedad, el residuo se redisolvió en MeOH (10 mg/mL) y filtró a través de una membrana PVDF (17 mm x 0.45 µm, TITAN) previo a su análisis por ultraHPLC. La cuantificación se realizó en un HPLC 1100 (Agilent Technologies, EUA) con detector de arreglo de diodos, con una columna ACE EXCEL c18-Amide (150 x 30 mm x 3 µm). La fase móvil consistió en ácido fórmico al 1% (A) y acetonitrilo (B), con un gradiente inicial de 0.5 de B, incremento lineal a 30% de B a los 10 min, permaneciendo así durante 10 min, finalmente un incremento lineal hasta 60% de B a los 30 min. Tiempo total de corrida de 35 min. Flujo de 0.4 mL/min y volumen de inyección de 15 µL. La detección se realizó a 320 nm. La cuantificación se realizó usando una curva de calibración con

estándar comercial de CAC y los resultados se expresaron como miligramos de CAC por 100 gramos de base seca (mg/ 100 g bs).

10. Diseño estadístico

Para el análisis de los datos se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 2 factores. Quedando de la siguiente manera:

Tiempo de almacenamiento a 15 °C 0, 5, 10, 15, 20 y 25 días

Tratamientos Control, TH, AscCa, TH-AscCa

Se utilizó la prueba de Fisher con un nivel de significancia con un $\alpha= 0.05$ y se utilizó un paquete estadístico Statgraphics plus 5.1.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. CONDICIONES ADECUADAS DE TIEMPO Y TEMPERATURA PARA LA APLICACIÓN DE UN TRATAMIENTO HIDROTÉRMICO

En el **Cuadro 7** se muestran las diferentes combinaciones de variables para la aplicación de un tratamiento hidrotérmico (temperatura (T) y tiempo (t)) en frutos de berenjena y los valores experimentales de las variables de respuesta (actividad de PME, ΔE , firmeza y contenido de antocianinas).

1. Modelos experimentales de predicción

A partir de los datos experimentales de PME, ΔE , firmeza y contenido de antocianinas en berenjena mostrados en el **Cuadro 7** se obtuvieron modelos de predicción, como resultado del polinomio “ $Y_i: B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_1^2X_1^2 + B_2^2X_2^2 + B_1B_2X_1X_2$ ”, que relaciona las variables de respuesta PME, ΔE , firmeza y contenido de antocianinas en berenjena, con las variables del TH (T y t). A estos modelos de predicción se les probó su idoneidad y ajuste por análisis de varianza (ANOVA). Meyers y Montgomery (2002) reportaron que un buen modelo de predicción debe tener una R^2 ajustada (coeficiente de determinación) ≥ 0.80 , un nivel de significancia de $p < 0.05$, un valor de coeficiente de varianza (CV) $\leq 10\%$ y prueba de falta de ajuste > 0.1 ; todos estos parámetros fueron usados para decidir el nivel de satisfacción de cada modelo.

Cuadro 7. Diseño experimental empleado para obtener diferentes combinaciones de temperatura (T) y tiempo (t) para la aplicación de un TH y los resultados experimentales de las variables de respuesta (firmeza, ΔE , PME, contenido de antocianinas).

Número de corrida	Factores del proceso		Variables de respuesta			
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	PME (U/g ff)	ΔE	Firmeza (N)	Antocianinas (Eq. of cianidina-3-glucosido /g ff)
1	30	5.00	1.333	1.063	31.9	5.128
2	50	5.00	2.305	1.125	27.56	2.935
3	30	15.00	1.706	1.076	31.9	4.928
4	50	15.00	2.788	1.152	26.3	2.324
5	25.86	10.00	1.353	1.059	32.75	5.375
6	54.14	10.00	2.922	1.149	26.2	2.417
7	40	2.93	1.422	1.075	31.8	4.924
8	40	17.07	2.236	1.14	28.75	3.472
9	40	10.00	1.638	1.093	31	4.578
10	40	10.00	1.624	1.101	32	4.873
11	40	10.00	1.597	1.098	31.5	4.67
12	40	10.00	1.668	1.091	30.9	4.873
13	40	10.00	1.59	1.107	31.2	4.696

a. Pectinmetilesterasa

Las berenjenas sometidas a diversos tratamientos hidrotérmicos presentaron valores de actividad de la enzima PME entre 1.333 y 2.922 (**Cuadro 7**). El análisis de varianza del modelo de predicción para la actividad de PME en berenjena, muestra la relación entre esta variable de respuesta y las variables del tratamiento hidrotérmico (T y t). El análisis de varianza mostró un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para la actividad de PME. Este análisis también mostró que la actividad de PME en las berenjenas fue significativamente dependiente de los términos lineales de la temperatura (T; $p < 0.0001$) y del tiempo (t; $p < 0.0001$), así como del término de interacción (T*t; $p < 0.3723$) y los términos cuadráticos de la temperatura (T²; $p < 0.0001$) y tiempo (t²; $p < 0.0011$). El modelo de predicción para determinar la actividad de PME en berenjena usando variables codificadas fue:

$$Y_{PME} = 1.62 + 0.53X_1 + 0.25X_2 + 0.027X_1X_2 + 0.27X_1^2 + 0.12X_2^2$$

El modelo de predicción para determinar la actividad de PME en berenjena usando variables no codificadas fue:

$$Y_{PME} = 3.978 - 0.168T - 0.064t + 5.477 \times 10^{-4}Tt + 2.695 \times 10^{-3}T^2 + 4.613 \times 10^{-3}t^2$$

Este modelo de predicción explicó el 95.77% de la variabilidad total ($p < 0.0001$) de los valores de la actividad de PME en berenjena. El coeficiente de determinación R² ajustada del modelo fue de 98.82% y la falta de ajuste no fue significativa ($p < 0.0525$). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con el modelo (CV) fue de 3.09%. Estos valores indican que el

modelo experimental para la determinación de la actividad de la enzima PME en berenjena fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo matemático de predicción de la actividad de PME se construyeron gráficos de contorno y de superficie de respuesta (**Figura 6**) en los cuales se observa el efecto de las variables del tratamiento hidrotérmico (T y t) sobre la actividad de PME.

En general, se puede apreciar que conforme aumentan el tiempo y temperatura del TH, mayor es la actividad de PME. Es importante mencionar que al aplicar el tratamiento con la temperatura de 54.14 °C (la mayor temperatura), la actividad de la enzima PME se mantuvo, mientras que el resto de las temperaturas si lograron una activación irreversible para todos los tratamientos. Estos resultados podrían deberse a que la enzima PME participa en el proceso de ablandamiento de los frutos mediante la hidrólisis de grupos metiléster de la pectina de la pared celular, este proceso se vería acelerado cuando el fruto es sometido a temperaturas altas, debido a que el estrés moderado provoca la activación de la enzima PME (Silveira y col 2011). Asimismo, ha sido mencionado en estudios previos que esta diferencia en la actividad de la enzima bajo diferentes temperaturas podría deberse a una termo-estabilidad baja de la enzima, ya que es el aumento de la temperatura lo que influye en mayor medida en la actividad de PME (Vivar y col 2007; Cerón y col 2016).

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los reportados previamente por Beirão da Costa y col (2008), quienes observaron en frutos de kiwi, que cuando se aumentaba el tiempo de 0 a 25 min y temperatura de 25 a 45 °C se

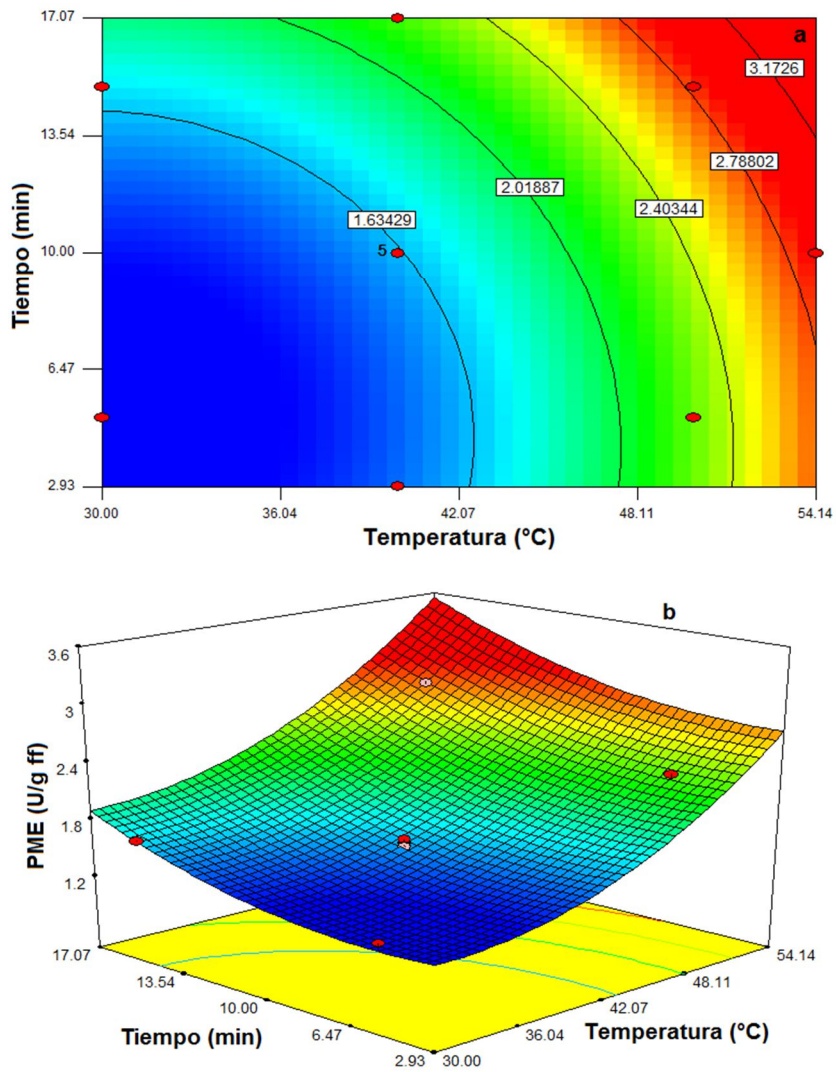


Figura 6. Gráfica de contornos (a) y de superficie de respuesta (b), donde se muestra el efecto de la temperatura (T) y el tiempo (t) sobre la actividad de la enzima pectinmetilesterasa (PME) en frutos de berenjena.

obtenía una mayor actividad de PME, la cual se triplicaba cuando el fruto se sometía a 45 °C (9.00 ± 0.98) en comparación a la aplicación de 25 °C (3.19 ± 0.32). Del mismo modo, Vicente y col (2005) aplicaron un TH a 45 °C por 3 h en fresas, obteniendo una actividad más alta de PME en comparación con el control. Estos resultados podrían ser adjudicados a que la aplicación del TH a temperaturas altas provocó una mayor solubilización de pectinas como resultado de la acción catalítica de enzimas de pared celular (Brummell 2006).

Asimismo, Silveira y col (2011) aplicaron un TH el cual consistió en una temperatura de 60 °C durante 1 min en frutos de melón, observando una mayor actividad de PME en los frutos tratados en comparación con el control. De la misma manera Martin-Diana y col (2005) obtuvieron mayor actividad de PME en muestras de lechuga sometidas a un TH por 1 min a 50 °C con respecto a las sometidas a 25 °C.

b. Diferencia total de color (ΔE)

Las berenjenas sometidas a diversos tratamientos hidrotérmicos presentaron valores del ΔE entre 1.06 y 1.15 (**Cuadro 7**). El análisis de varianza del modelo de predicción para el ΔE en berenjena muestra la relación entre esta variable de respuesta y las variables del tratamiento hidrotérmico (T y t). El análisis de varianza mostró un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$).

Este análisis también mostró que el parámetro ΔE en las berenjenas fue significativamente dependiente de los términos lineales del tiempo (t; $p < 0.0009$) y la temperatura (T; $p < 0.0001$), así como del término de interacción (t^*T ; $p < 0.4407$) y los

términos cuadráticos del tiempo (t^2 ; $p < 0.4051$) y temperatura (T^2 ; $p < 0.2151$). El modelo de predicción para determinar el ΔE en berenjena usando variables codificadas fue:

$$Y_{\Delta E} = 1.10 + 0.033X_1 + 0.017X_2 + 3.478 \times 10^{-3}X_1X_2 + 2.858 \times 10^{-3}X_1^2 + 4.398 \times 10^{-3}X_2^2$$

El modelo de predicción para determinar el ΔE en berenjena usando variables no codificadas fue:

$$Y_{\Delta E} = 1.023 + 3.36 \times 10^{-4}T - 2.997 \times 10^{-3}t + 6.955 \times 10^{-5}Tt + 2.858 \times 10^{-5}T^2 + 1.759 \times 10^{-3}t^2$$

Este modelo de predicción explicó el 77.02% de la variabilidad total ($p < 0.0001$) de los valores del parámetro ΔE en berenjena. El coeficiente de determinación R^2 ajustada del modelo fue de 92.58% y la falta de ajuste no fue significativa ($p < 0.1741$). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con el modelo (CV) fue de 0.77%. Estos valores indican que el modelo experimental para determinar parámetro ΔE en berenjena fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo matemático de predicción del parámetro ΔE se construyeron gráficos de contorno y de superficie de respuesta (**Figura 7**) en los cuales se observa el efecto de las variables del tratamiento hidrotérmico (T y t) sobre el parámetro ΔE .

Se pueden observar que a mayores tiempos y temperatura del tratamiento hidrotérmico en frutos de berenjena, se presentan los mayores cambios en su color externo. Este comportamiento podría ser atribuido a que la exposición de las berenjenas a un factor de estrés moderado (tratamiento hidrotérmico) estaría provocando una mayor degradación de compuestos fenólicos (Concellón y col 2012).

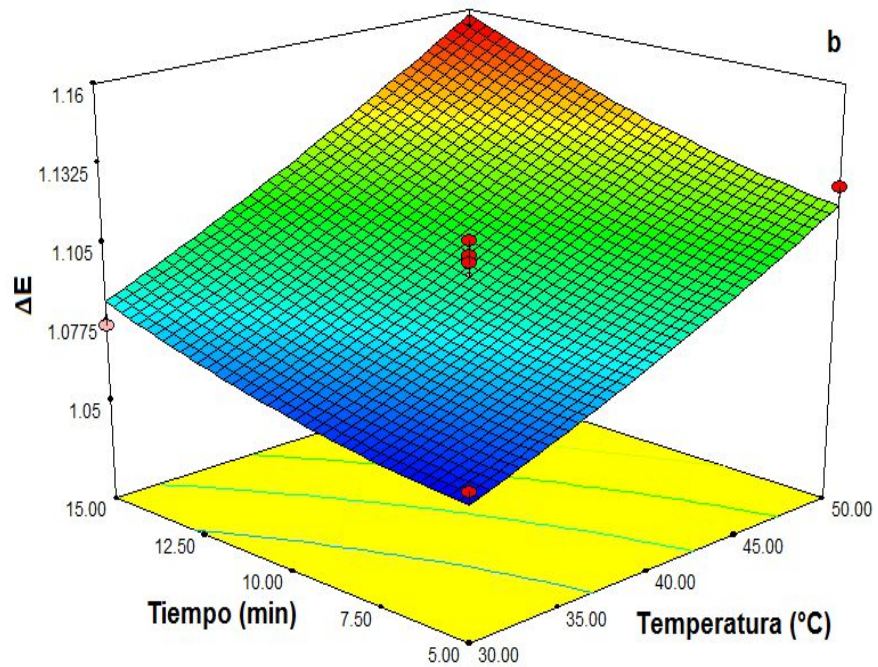
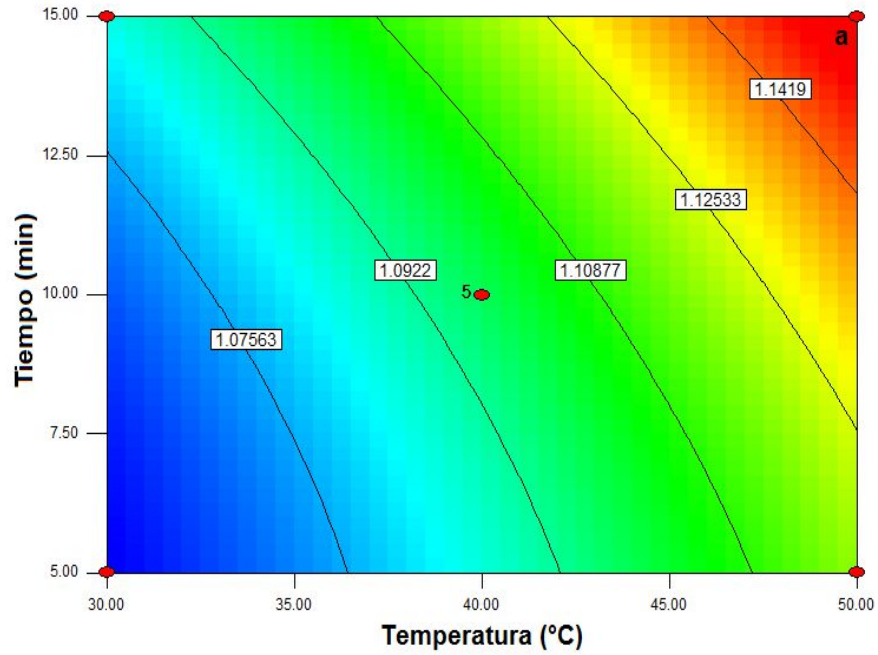


Figura 7. Gráficas de contorno (a) y de superficie de respuesta (b), donde se muestra el efecto del tiempo (t) y temperatura (T) sobre la variación de color ΔE en frutos de berenjena.

El color es un parámetro sensorial muy importante en los frutos de berenjena. Es importante mencionar que la degradación de antocianinas causa un fenómeno de oscurecimiento en la cáscara al ser esta expuesta a temperaturas altas.

En la investigación realizada por Zhang y col (2014) en pepino se aplicaron tres diferentes TH, dos TH intermitentes (40 °C por 30 y 50 min) y uno continuo (40 °C por 30 min) estos presentaban efectos positivos en cuanto a la disminución del desarrollo de zonas amarillas en la cáscara de los frutos, tal como se observó en hojas de espinaca (Gómez y col 2008) y floretes de brócoli (Suzuki y col 2005). Mientras que el tratamiento continuo a una temperatura de 40 °C por 50 min provocó un estrés severo, causando una evidente etiolación durante el almacenamiento (Zhang y col 2014).

c. Firmeza

Las berenjenas sometidas a diversos TH presentaron valores de firmeza entre 26.2 y 32.75 N (**Cuadro 7**). El análisis de varianza del modelo de predicción para firmeza en berenjena, muestra la relación entre esta variable de respuesta y las variables del TH (T y t). El análisis de varianza mostró un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para firmeza. Este análisis también mostró que la firmeza en las berenjenas fue significativamente dependiente de los términos lineales del tiempo (t; $p < 0.0001$) y la temperatura (T; $p < 0.0124$), así como del término de interacción (t*T; $p < 0.3208$) y los términos cuadráticos del tiempo (t²; $p < 0.0024$) y temperatura (T²; $p < 0.0246$). El modelo de predicción para determinar la firmeza en berenjena usando variables codificadas fue:

$$Y_{\text{Firmeza}} = 31.32 - 2.40X_1 - 0.70X_2 - 0.31X_1X_2 - 1.04X_1^2 - 0.64X_2^2$$

El modelo de predicción para determinar la firmeza en berenjena usando variables no codificadas fue:

$$Y_{\text{Firmeza}} = 20.645 + 0.653T + 0.0623t - 6.3 \times 10^{-3}Tt - 0.010T^2 - 0.026t^2$$

Este modelo de predicción explicó el 79.16% de la variabilidad total ($p < 0.0001$) de los valores de firmeza en berenjena. El coeficiente de determinación R^2 ajustada del modelo fue de 93.28% y la falta de ajuste no fue significativa ($p < 0.1738$). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con el modelo (CV) fue de 1.95%. Estos valores en conjunto indican que el modelo experimental para la determinación de la firmeza en berenjena fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo matemático de predicción de los valores de firmeza se construyeron gráficos de contorno (**Figura 8a**) y de superficie de respuesta (**Figura 8b**) en los cuales se observó el efecto de las variables del TH (T y t) sobre la firmeza. Estos gráficos muestran que a menor tiempo y temperatura de aplicación del TH, más elevado se mantiene el parámetro de firmeza. Lo cual coincide con lo observado en la evaluación de actividad de la enzima PME, donde se observó que a mayor tiempo y temperatura se obtenía una mayor actividad de esta enzima, la cual es causante de una pérdida de firmeza acelerada.

El ablandamiento acelerado o pérdida de firmeza se presenta en diversos productos hortofrutícolas gracias a las constantes variaciones químicas de algunos componentes de la pared celular, como lo son celulosa, hemicelulosa, pectinas y actividad enzimática (Ruíz Cruz 2002). Beirão da Costa y col (2006) observaron en

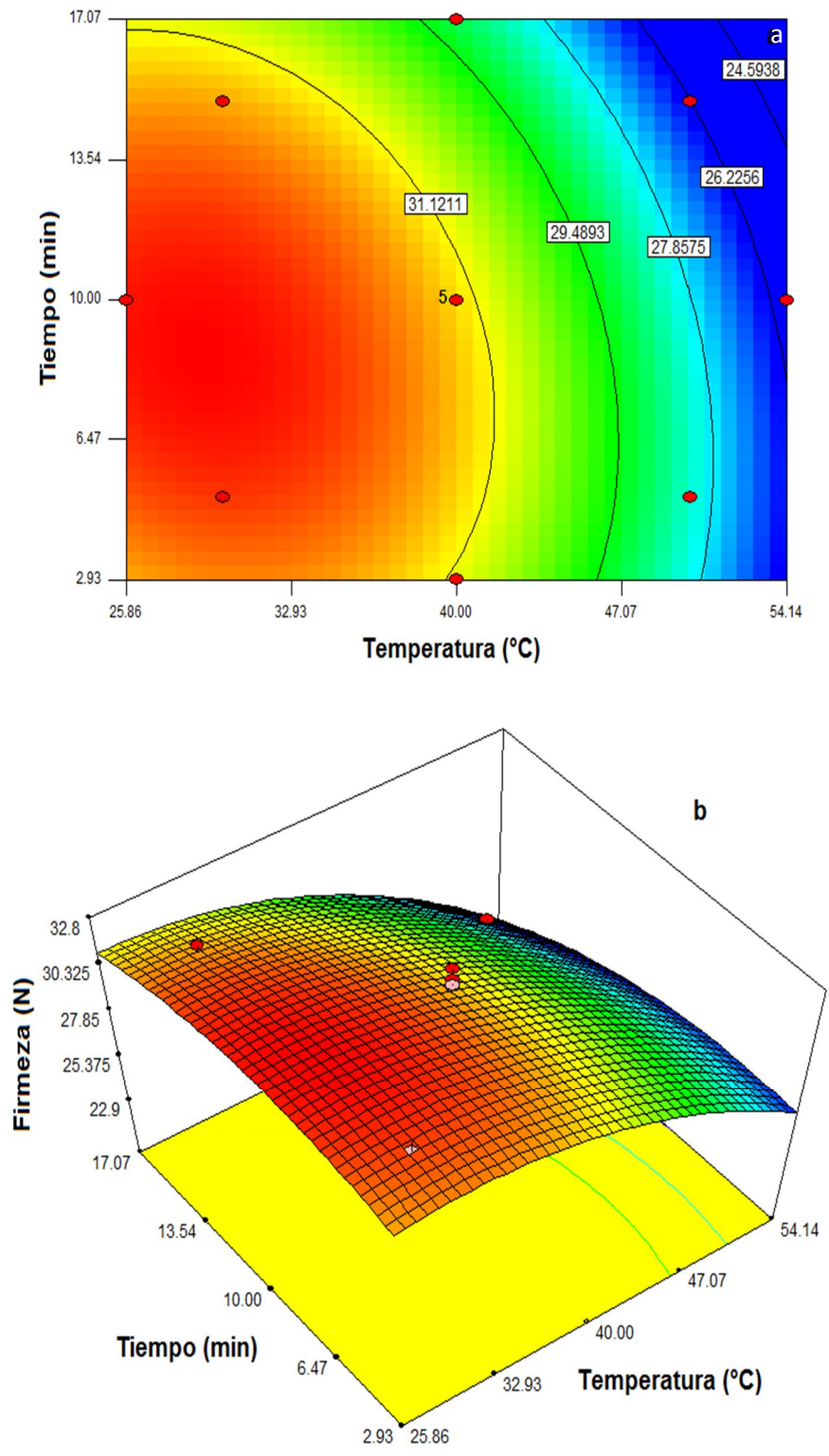


Figura 8. Gráficas de contorno (a) y de superficie de respuesta (b), donde se muestra el efecto del tiempo (t) y temperatura (T) sobre la firmeza (N) en frutos de berenjena.

frutos de kiwi mínimamente procesados que su inmersión en agua caliente (45 °C durante 25 min) mantuvo la firmeza por un período de 10 días. Resultados similares a estos fueron obtenidos por Beirão da Costa y col (2008) en frutos de kiwi quienes observaron que después de un periodo de almacenamiento de 3 días las muestras control sufrieron una rápida pérdida de firmeza (64%) respecto al primer día de almacenamiento, dichas muestras mostraron valores significativamente diferentes en relación a aquellas tratadas con un TH (45 °C durante 25 min).

De igual manera, Fan y col (2008) encontraron una mayor retención de firmeza en melón inmerso en agua caliente (70 °C) durante 3 min, comparado con el melón inmerso en agua fría (10 °C) por 20 min. Estos autores mencionan que la retención de la firmeza estaría relacionada a una menor actividad de enzimas degradadoras de pared celular (PG, PME, glucanasa y galactosidasa).

d. Contenido de antocianinas

Las berenjenas sometidas a diversos TH presentaron valores de contenido de antocianinas entre 2.32 y 5.38 EC3G/g base seca (bs) (**Cuadro 7**). El análisis de varianza del modelo de predicción para el contenido de antocianinas en berenjena, muestra la relación entre esta variable de respuesta y las variables del TH (T y t). El análisis de varianza mostró un modelo cuadrático significativo ($p < 0.0001$) para el contenido de antocianinas. Este análisis también mostró que el parámetro ΔE en las berenjenas fue significativamente dependiente de los términos lineales del tiempo (t; $p < 0.0001$) y la temperatura (T; $p < 0.0040$), así como del término de interacción (t^*T ; $p < 0.4198$) y los términos cuadráticos del tiempo (t^2 ; $p < 0.0012$) y temperatura (T^2 ;

p<0.0092). El modelo de predicción para el contenido de antocianinas en berenjena usando variables codificadas fue:

$$Y_{\text{antocianinas}} = 4.74 - 1.12X_1 - 0.36X_2 - 0.10X_1X_2 - 0.48X_1^2 - 0.32X_2^2$$

El modelo de predicción para determinar el contenido de antocianinas en berenjena usando variables no codificadas fue:

$$Y_{\text{antocianinas}} = 0.211 + 0.289T + 0.27t - 2.058 \times 10^{-3}Tt - 4.758 \times 10^{-3}T^2 - 0.013t^2$$

Este modelo de predicción explicó el 81.71% de la variabilidad total (p<0.0001) de los valores del contenido de antocianinas en berenjena. El coeficiente de determinación R² ajustada del modelo fue de 94.92% y la falta de ajuste no fue significativa (p<0.057). Además, la dispersión relativa de los puntos experimentales con respecto a los valores predichos con el modelo (CV) fue de 5.66%. Estos valores indican que el modelo experimental para la determinación de la actividad de la enzima PME en berenjena fue adecuado y reproducible.

A partir del modelo matemático de predicción del contenido de antocianinas se construyeron gráficos de contorno (**Figura 9a**) y de superficie de respuesta (**Figura 9b**) en los cuales se observa el efecto de las variables del tratamiento hidrotérmico (T y t) sobre el contenido de antocianinas.

Las antocianinas son pigmentos naturales que podemos encontrar concentrados en la cáscara de frutos de berenjena, su contenido varía desde 80 a 850 mg/kg debido a factores genéticos y agronómicos, intensidad y tipo de luz, temperatura, procesamiento y almacenamiento (Dranca y Oroian 2016). En estas

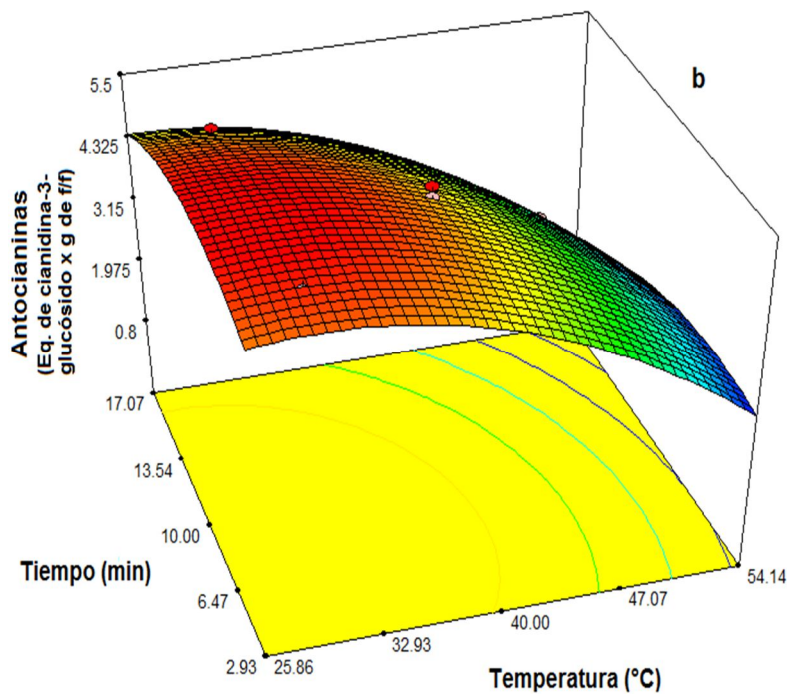
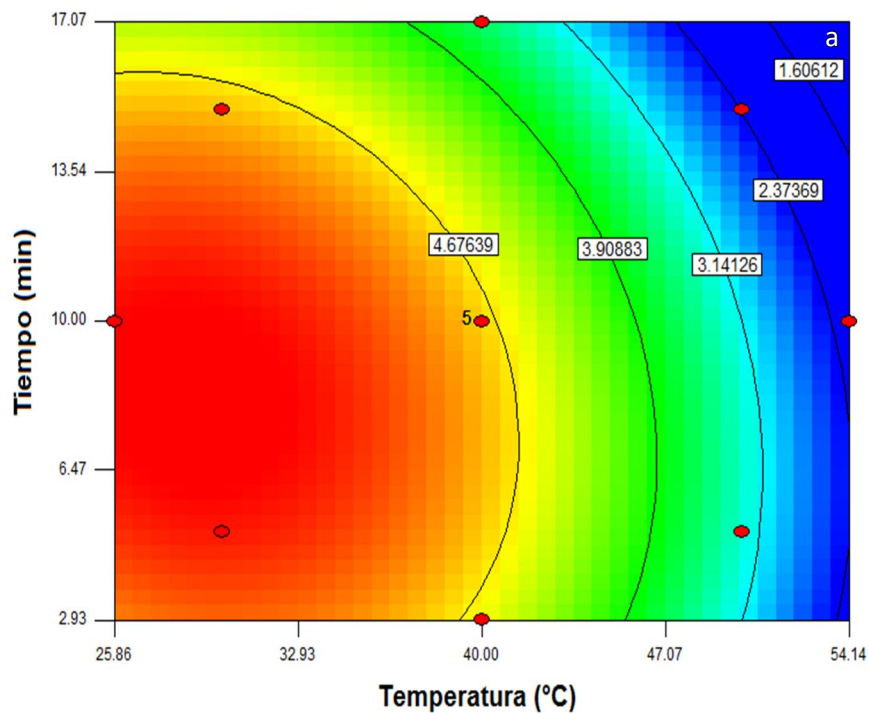


Figura 9. Gráficas de contorno (a) y de superficie de respuesta (b), donde se muestra el efecto de la temperatura (T) y tiempo (t) sobre el contenido de antocianinas en frutos de berenjena.

gráficas podemos observar el efecto que tuvieron los factores tiempo y temperatura en el contenido de antocianinas, ya que cuando dichos factores eran mayores, el contenido de antocianinas era menor, lo cual estaría indicando una mayor degradación de estas, resultados que coinciden con los obtenidos en cuanto al cambio de color en la superficie del fruto.

Morales-Delgado y col (2014) mencionan en su estudio realizado en trozos de fresa deshidratada a 60, 70, 80 y 90 °C usando aire caliente, que la degradación y los cambios en la coloración de las fresas dependieron en gran medida de la temperatura aplicada, ya que la mayor estabilidad en cuanto a la concentración de antocianinas se obtuvo cuando se aplicó la temperatura más baja (60 °C), donde la pérdida de este pigmento fue de 37.04% en comparación con la aplicación de la temperatura más alta (90 °C), donde la pérdida fue de un 55.32%.

2. Optimización

La **Figura 10**, obtenida a partir de la sobreposición de las gráficas de contorno (**Figuras 6, 7, 8 y 9**), se utilizó para conocer la mejor combinación de variables de proceso para la obtención de un tratamiento hidrotérmico óptimo. El punto central de la región de optimización, corresponde a la combinación óptima de variables de proceso (temperatura (T) = 40 °C/ tiempo (t) = 15 min) para obtener valores adecuados del TH. Los valores predichos usando los modelos de predicción de cada una de las variables de respuesta y las condiciones óptimas del TH fueron: actividad de PME: 1.99 U/g ff; color (ΔE): 1.12; firmeza: 29.9 N; contenido antocianinas: 4.05 EC3G/g bs. El TH obtenido con las condiciones óptimas se desarrolló aplicando la mejor

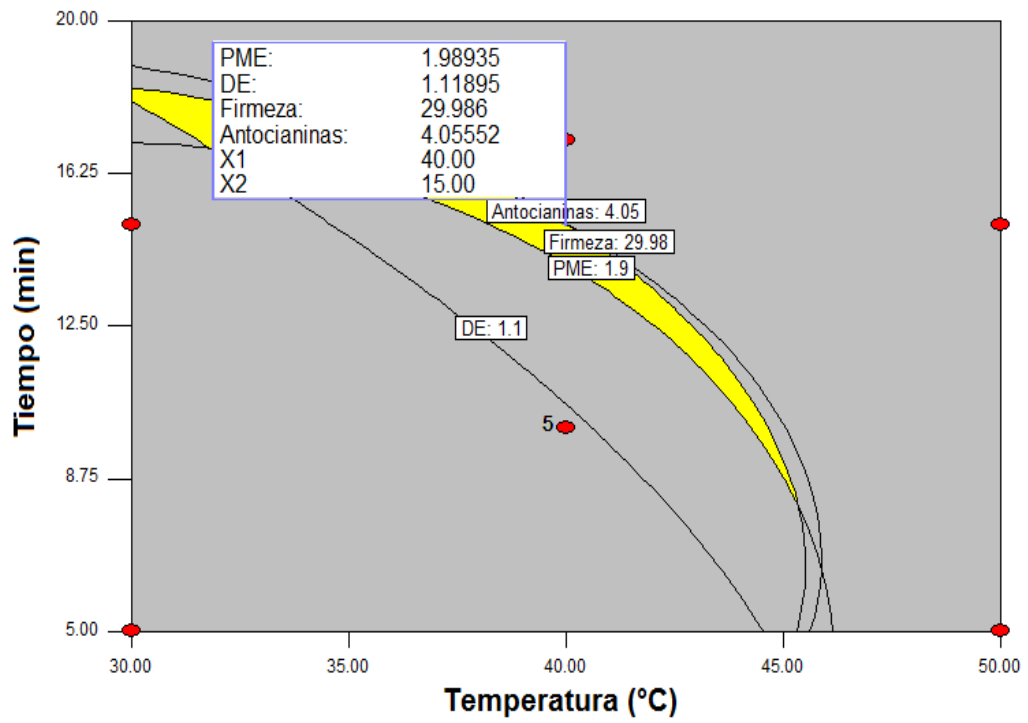


Figura 10. Gráfico de optimización de variables de proceso del tratamiento hidrotérmico.

combinación de variables de tiempo y temperatura. Los valores experimentales de actividad de PME, parámetro ΔE , firmeza y contenido de antocianinas obtenidos con condiciones óptimas (1.62 U/g ff, 1.09, 31.32 N y 4.74 EC3G/g bs, respectivamente) fueron similares a los valores predichos mencionados anteriormente, indicando que las condiciones óptimas del proceso del TH fueron adecuadas y reproducibles.

B. ANÁLISIS DE CALIDAD

1. Índice de Oscurecimiento

El oscurecimiento en berenjenas ocurre fácilmente después de ser partidas o de que se les retira la cáscara, lo cual afecta su calidad y valor nutricional, lo cual conlleva a una disminución en su valor comercial. El oscurecimiento es el resultado de una serie de procesos fisiológicos y bioquímicos en frutos que se encuentran en senescencia o condiciones adversas (Liu y col 2021).

En la **Figura 11** se puede observar que el control fue quien mostró el mayor índice de oscurecimiento durante todo el almacenamiento, mostrando los mayores valores al final de este (2.8). Los tratamientos TH y AscCa tuvieron comportamientos similares durante este estudio, teniendo ligeras fluctuaciones entre ellos durante todo el almacenamiento, sin mostrar diferencias significativas ($p > 0.05$). Por otra parte, el tratamiento TH-AscCa fue quien presentó el menor índice de oscurecimiento, ya que al principio del estudio mostró un daño mínimo (0.2) para finalizar al día 25 de almacenamiento con los mejores valores respecto al resto de los tratamientos (1.8).

El oscurecimiento es un fenómeno común en el procesamiento y uso en general de los productos hortofrutícolas. Los factores que se encuentran involucrados en el

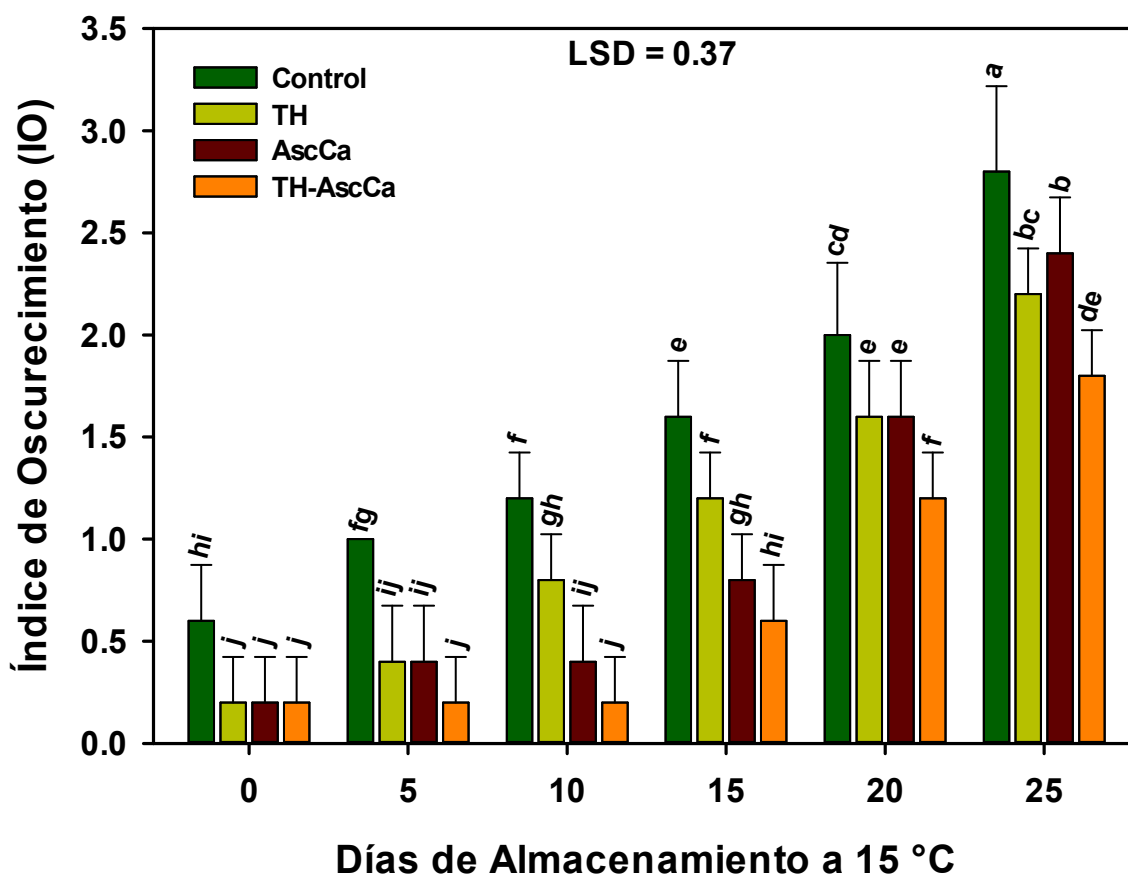


Figura 11. Índice de oscurecimiento (IO) en frutos de berenjena tratados con un tratamiento hidrotérmico (TH), ascorbato de calcio (AscCa) y su combinación (TH-AscCa) durante el almacenamiento a 15 °C por 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Las barras verticales indican la desviación estándar (DE) (n=6). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

oscurecimiento de manzana (Tang y col 2020), pera (Tao y col 2019) y papa (Liu y col 2019) han sido extensamente estudiados. Cuando los productos hortofrutícolas sufren daño mecánico o se encuentran en ambientes adversos, los polifenoles en su interior se oxidan bajo la acción catalítica de la enzima PPO y se transformarán a un color marrón, para que se lleve a cabo este proceso, es necesaria la participación de oxígeno, enzimas y sustratos (Sajid y col 2020). Se ha mencionado que cuando los frutos sufren alteraciones, el proceso de peroxidación lipídica de la membrana se ve acelerado y la permeabilidad de la membrana incrementa, por lo que el contacto entre enzimas y sustratos inducirá el oscurecimiento (Wei y Zhao 2020). Por tanto, diversos investigadores han encontrado que la principal razón para que se presente el oscurecimiento en frutas y hortalizas podrían ser las alteraciones al sistema membranal, así como una activación en la actividad de enzimas oxidativas como PPO y POD (Wei y Zhao 2020; Liu y col 2021).

Nuestros resultados coinciden con los obtenidos por Tsouvaltzis y col (2011), ya que, cuando aplicaron un TH (55 °C x 10 min) en papa, observaron un menor oscurecimiento en los trozos del tubérculo al ser rebanado, en comparación con el control. Estos autores relacionaron el oscurecimiento severo con un incremento del 25 y 71% en el contenido fenólico y capacidad antioxidante, respectivamente. Asimismo, estos resultados coinciden con los reportes obtenidos por Ma y col (2014), ya que, al aplicar un TH de 45 °C en frutos de kiwi, obtuvieron un menor oscurecimiento en la pulpa comparado con los frutos control almacenados a 0 °C.

En nuestro trabajo, se observó una disminución en el IO al igual que en los reportados para fresa (Abd-Elhady 2014) y manzana (Varella y col 2007) tratados con

calcio, en comparación con el control, encontrando además que entre mayor era la concentración de calcio menores eran los síntomas de oscurecimiento observados en la pulpa de los frutos. Se ha mencionado que las sales de calcio representan una alternativa para tratar frutos susceptibles al oscurecimiento de la pulpa, ya que una mayor presencia de calcio en la membrana mejora la capacidad de retención de agua de los frutos, debido a una mayor formación de redes pécticas, lo cual genera un retraso en la aparición de zonas oscuras en diversos productos hortofrutícolas (Khaliq y col 2015).

Nuestros resultados también coinciden con los obtenidos por Hossain y col (2020), ya que ellos observaron que al aplicar un TH en combinación con CaCl_2 (1 ~ 4%) en frutos de mango se provocaba una disminución en el oscurecimiento de la pulpa en comparación con el control.

2. Pérdida de peso (%PP)

El mecanismo principal de pérdida de peso en productos hortofrutícolas es la pérdida de humedad, la cual es la difusión del vapor de agua debido a la presencia de un gradiente de presión entre el interior y el exterior del fruto (Figuroa y col 2011). La pérdida de peso en frutos comúnmente se encuentra ligada a la actividad metabólica del fruto, respiración y transpiración (Zhou y col 2002).

Conforme transcurrió el periodo de almacenamiento se observó un incremento en la pérdida de peso en los frutos de los 4 tratamientos (**Figura 12**), sin mostrar diferencia significativa ($p>0.05$) entre ellos durante los primeros 12 días de almacenamiento. Sin embargo, a partir del día 16 los frutos tratados con ascorbato de

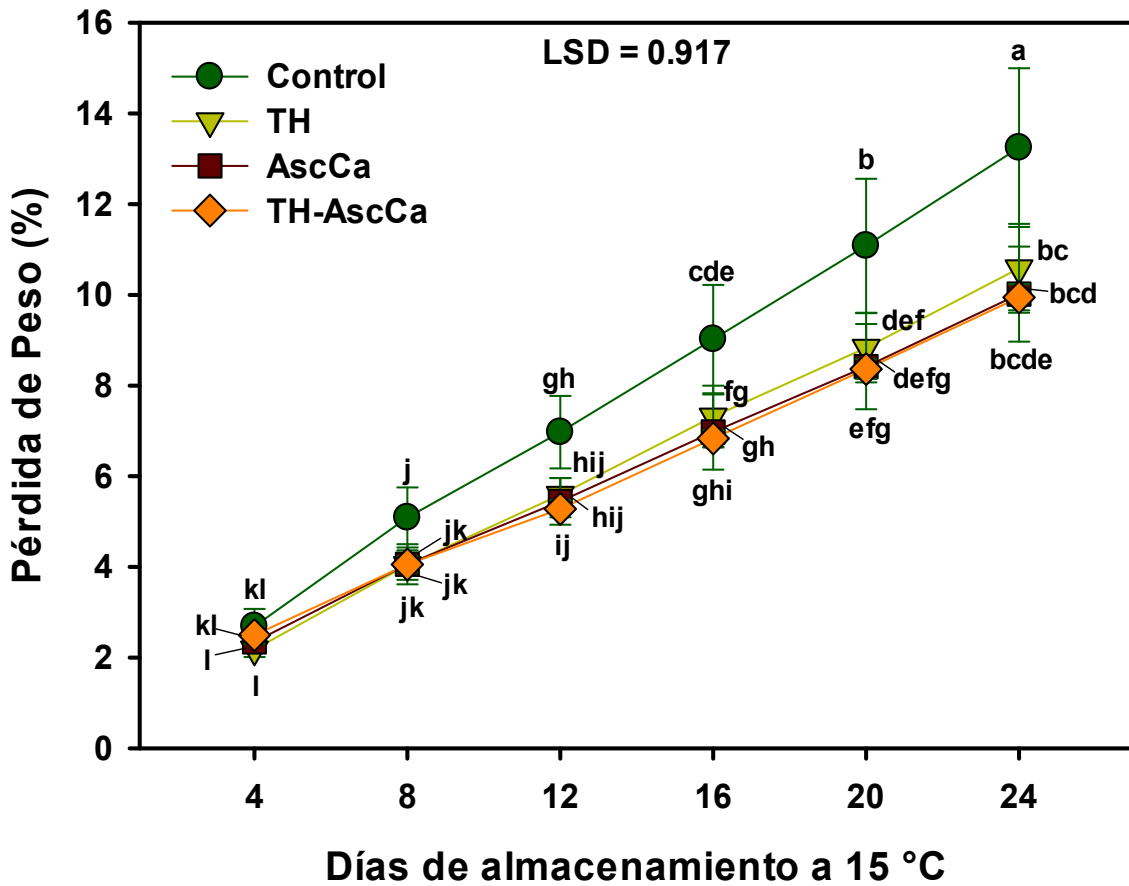


Figura 12. Pérdida de peso (%) en frutos de berenjena tratados con un tratamiento hidrotérmico (TH), ascorbato de calcio (AscCa) y su combinación (TH-AscCa) durante el almacenamiento a 15 °C por 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=7). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

calcio (AscCa y TH-AscCa) presentaron diferencia significativa ($p > 0.05$) respecto al control, pero no entre ellos hasta el final del almacenamiento. Al finalizar el periodo de almacenamiento (día 24) los frutos a los cuales se les aplicó TH-AscCa presentaron el menor valor de pérdida de peso (9.94%) respecto al resto de los tratamientos, sin presentar diferencia significativa con los tratamientos AscCa y TH (10.01 y 10.58%, respectivamente).

Diversos autores han mencionado que la pérdida de peso está directamente relacionada con la tasa de transpiración de los productos frescos (Castricini y col 2009). Los resultados obtenidos en esta investigación en relación con la aplicación de AscCa podrían deberse a que este tratamiento genera un refuerzo en la pared celular previniendo el intercambio gaseoso y con ello la pérdida de humedad y de peso (Akhtar y col 2010), este efecto también ha sido reportado en pera (Mahajan y Dhatt 2004), tomate (Tuna y col 2007), durazno (Sohail y col 2015) y berenjena (Barbagallo y col 2015). Los resultados de esta investigación coinciden con aquellos reportados por Fan y col (2016) en berenjena, quienes observaron una pérdida de peso de 4.5% en los frutos control en el día 10 de almacenamiento, lo cual podría estar relacionado al rol crítico que tiene el etileno en cuanto al proceso de senescencia en hortalizas, ya que promueve la transcripción y traducción de genes relacionados a dicho proceso (Guo y col 2014). Asimismo, el calcio citosólico también retrasa el proceso de envejecimiento y disminuye la pérdida de peso de la fruta, al reducir la tasa de respiración y transpiración (Tuna y col 2007).

La reducción en la pérdida de peso de diversos productos hortofrutícolas ha sido reportada en kumquat (Schirra y col 1995), mango (Angasu y col 2014) y pepino

(Nasef y col 2018), en este último fruto se observó que, al aplicar un TH (55 °C por 5 min) se redujo significativamente la pérdida de peso, donde la aplicación de dicho tratamiento mostró la menor pérdida de peso en comparación con el control. Estos resultados serían indicadores de que este tratamiento estaría mejorando las funciones de barrera del fruto (membranas y pared celular o la cutícula y la cera epicuticular) (Rodov y col 1995).

Nuestros resultados coinciden con los obtenidos en melón dulce, donde se demostró que el efecto del TH en conjunto con el cloruro de calcio fue más efectivo que el tratamiento con cloruro de calcio solo para disminuir la pérdida de peso; la razón fue el aumento del calcio unido a la membrana y al calcio citosólico debido a la influencia del TH (Lamikanra y Watson 2004).

3. Firmeza

Los cambios en la firmeza se pueden presentar debido a las variaciones químicas de algunos de los principales componentes de la pared celular, como lo son pectinas, celulosa y hemicelulosa (Ruíz-Cruz 2002).

En la **Figura 13** se muestran los valores de firmeza de berenjena durante un período de almacenamiento a 15 °C, donde se observó que los factores temperatura y tiempo de almacenamiento tuvieron efecto sobre la firmeza de los frutos. Al inicio del almacenamiento se evaluó un grupo control para todos los tratamientos, los cuales presentaron valores de firmeza de 38 N. A partir del día 5 de almacenamiento, la combinación TH-AscCa (34 N) presentó la menor pérdida de firmeza, el cual mostró diferencia significativa respecto al resto de los tratamientos durante toda la

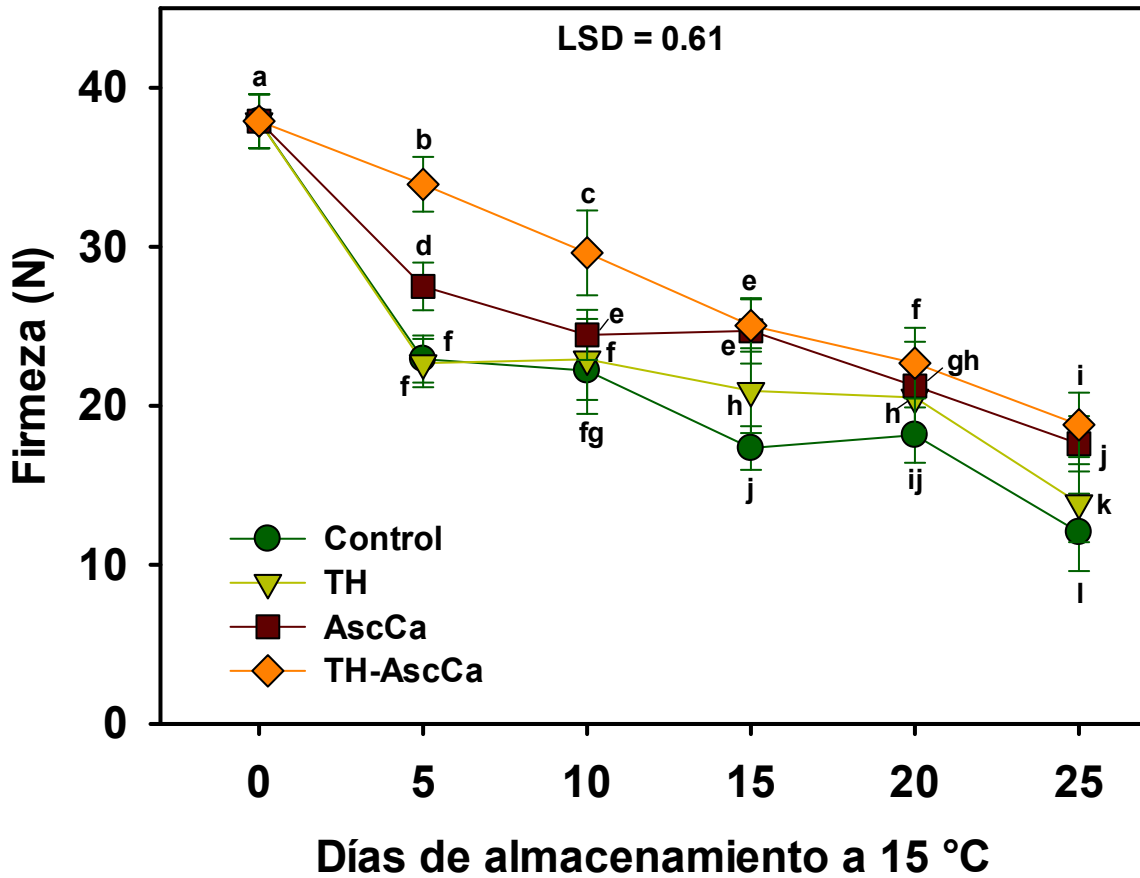


Figura 13. Parámetro firmeza (N) en frutos de berenjena tratados con un tratamiento hidrotérmico (TH), ascorbato de calcio (AscCa) y su combinación (TH-AscCa) durante el almacenamiento a 15 °C por 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=5). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

investigación, con excepción del día 15, donde el TH-AscCa presentó valores muy similares al tratamiento AscCa (25 y 24 N, respectivamente), siendo ambos tratamientos los que obtuvieron los mejores valores a lo largo de este estudio. El TH mostró una tendencia similar ($p>0.05$) al control a lo largo del almacenamiento, presentando diferencias significativas a partir del día 15, aun así, teniendo valores muy por debajo en comparación con los tratamientos AscCa. Al final, todos los tratamientos presentaron una reducción en la firmeza para terminar con valores por debajo de 20 N (control 68.23%, TH 63.38%, AscCa 53.54% y TH-AscCa 50.5%).

En la presente investigación se observó que el TH por sí solo tuvo un efecto muy reducido para conservar la firmeza en las berenjenas, ya que no mostró diferencia significativa con respecto al control en los primeros 10 días de almacenamiento, pero al ser combinado con AscCa se obtuvo una mejor retención de la firmeza, lo cual podría estar relacionado con una reducción en la actividad de enzimas que se encargan de degradar la pared celular, como lo son las enzimas PME, PG y β -Gal (Silveira y col 2011). Los resultados obtenidos para los tratamientos AscCa y TH-AscCa, se podrían relacionar con la capacidad que presenta el calcio para la formación de pectatos de calcio que mantienen la estructura de la pared y membrana celular (Ayón-Reyna y col 2015). Además de que los iones de calcio podrían también mejorar la firmeza de las berenjenas mediante la unión con fosfolípidos y proteínas en la superficie de la membrana, contribuyendo así a un incremento en la integridad de la misma (Hirschi 2004). Asimismo, este efecto podría ser causado al entrecruzamiento de grupos carboxilos cargados negativamente en la pectina desesterificada de la lámina media y pared celular con los iones de calcio en las soluciones (Hasegawa 2006). Además,

Barbagallo y col (2012) observaron una mayor retención de firmeza en cubos de berenjena a los cuales se les aplicó citrato y ascorbato de calcio.

Lo observado en el presente trabajo concuerda con el reporte de Chávez-Sánchez y col (2013) en frutos de papaya tratadas hidrotérmicamente (55 °C x 3, 6 y 9 min), ya que los frutos control y tratados no presentaron diferencias significativas en la firmeza. Por otra parte, Manganaris y col (2013) observaron que al aplicar sales de calcio en combinación con un TH (TH-CaCl₂, propionato de calcio y lactato de calcio) en frutos de durazno la firmeza se mantenía en comparación con el control durante el almacenamiento. Asimismo, en frutos de melón mínimamente procesados tratados con calor y sales de calcio y almacenados a 5 °C, se observó una mayor retención de la firmeza con respecto al control, lo que fue atribuido al efecto sinérgico de los tratamientos y la reducción metabólica por el almacenamiento (Silveira y col 2011).

C. ACTIVIDAD DE ENZIMAS DEGRADADORAS DE PARED CELULAR

1. Pectinmetilesterasa

En la **Figura 14** se presentan los resultados obtenidos de la actividad de la enzima PME en frutos de berenjena tratadas con TH, AscCa o con la combinación TH-AscCa y almacenados a 15 °C. En general, se mostró una disminución constante en la actividad de esta enzima para todos los tratamientos durante el almacenamiento, siendo los frutos tratados con TH los que presentaron la mayor actividad durante todo el almacenamiento, los cuales no mostraron diferencias estadísticas con los frutos tratados con calcio a partir del día 5 y hasta el día 20 del almacenamiento. Por su parte, los frutos tratados con AscCa presentaron la menor actividad de PME en general

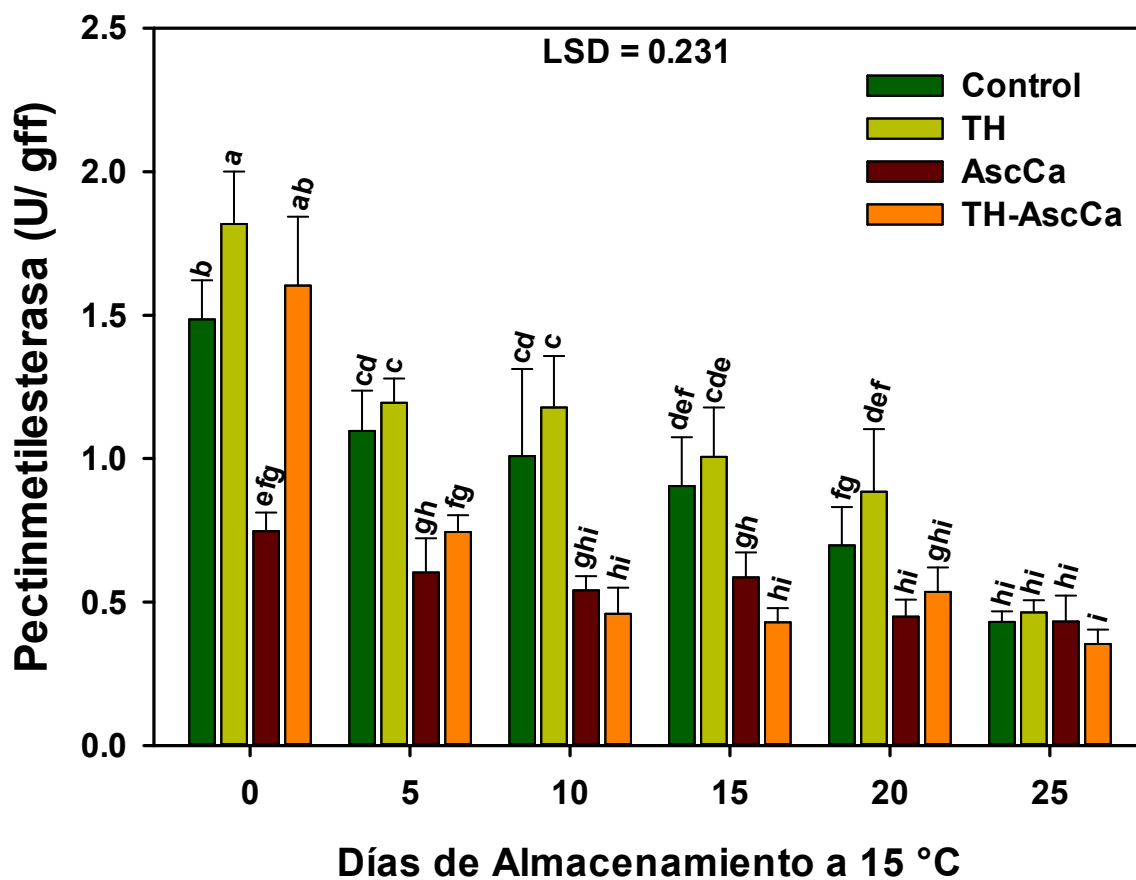


Figura 14. Actividad de la enzima pectinmetilesterasa (PME) en frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) almacenados a 15 °C por un periodo de 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=6). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

durante el almacenamiento a pesar de no mostrar diferencias significativas con los frutos tratados con la combinación TH-AscCa a partir del día 5. Este comportamiento podría deberse a que el uso de la sal de calcio redujo la actividad de PME porque la presencia de cationes como Ca^{2+} se enlazan a los grupos carboxilo libres produciendo pectatos de calcio que fortalecen la pared celular (Silveira y col 2011). Este proceso se incrementa cuando los frutos son sometidos a temperaturas altas antes de la aplicación de sales de calcio, ya que se realiza la activación de esta enzima, generando ácidos pécticos libres que contienen nuevos grupos carboxilos disponibles y de esta forma, los iones Ca^{2+} tanto endógenos como exógenos se unen a estos grupos, lo que resulta en una mayor estabilización de la pared celular y el mantenimiento de la firmeza, lo cual podría explicar el menor contenido de AscCa en el día 0 respecto al resto de los tratamientos (Ni y col 2005).

Barbagallo y col (2012) describieron que los frutos de berenjena son susceptibles al ablandamiento durante el almacenamiento, incluso bajo enfriamiento; este proceso está relacionado con la degradación enzimática de la laminilla media de la pared celular y la pérdida de adhesión celular. En particular, la PME es la enzima involucrada en la desesterificación de los homogalacturonanos de la pared celular, que es la fase de inicio de la despolimerización, ya que se convierten en sustratos de PG con el consiguiente ablandamiento de los tejidos. Por lo tanto, podría esperarse una mayor actividad de PME inicial y una mayor actividad de PG al final del almacenamiento lo cual coincide con los resultados obtenidos en cuanto a PME en este estudio.

Estudios como el de Beirão y col (2008) en frutos de kiwi sugieren que una menor actividad de PME puede estar asociada a la formación de pectatos de calcio, ellos informaron que el efecto de la disminución en la actividad de la enzima en kiwi sometido a un tratamiento TH-CaCl₂ (45 °C, 25 min, 3.0%) se debe a que la presencia de calcio en el tratamiento hidrotérmico reduce la actividad de PME, debido a la formación de estructuras que permitían mantener la firmeza de la pared celular. De igual forma, Manganaris y col (2013) demostraron que al combinar TH-CaCl₂ en frutos de durazno, la actividad de la enzima PME se ve minimizada durante su almacenamiento a 20 °C. Previamente se observaron resultados similares en manzana tratada con calcio (Ortiz y col 2011) y papayas tratadas hidrotérmicamente (Chávez-Sánchez y col 2013).

Asimismo, la disminución de la actividad de PME durante la maduración podría estar asociada a la senescencia, ya que facilita la desmetilación y degradación de la pared celular y laminilla media, por lo tanto, hay menor cantidad de sustrato para que trabaje la enzima y con ello una menor actividad enzimática (Díaz-Corona y col 2020).

2. Poligalacturonasa (PG)

Para la actividad de la enzima PG los frutos tratados con TH y AscCa mostraron la mayor y menor actividad, respectivamente (**Figura 15**); observándose que el AscCa redujo la actividad y el TH incrementó la actividad en comparación con el control, mostrando diferencias significativas entre ellos, lo que coincide con la actividad de la enzima PME descrita en la Figura 13. Esta enzima presentó un incremento en su actividad durante los primeros 10 días de almacenamiento, posteriormente los frutos manifestaron una disminución en su actividad, destacándose una pronunciada

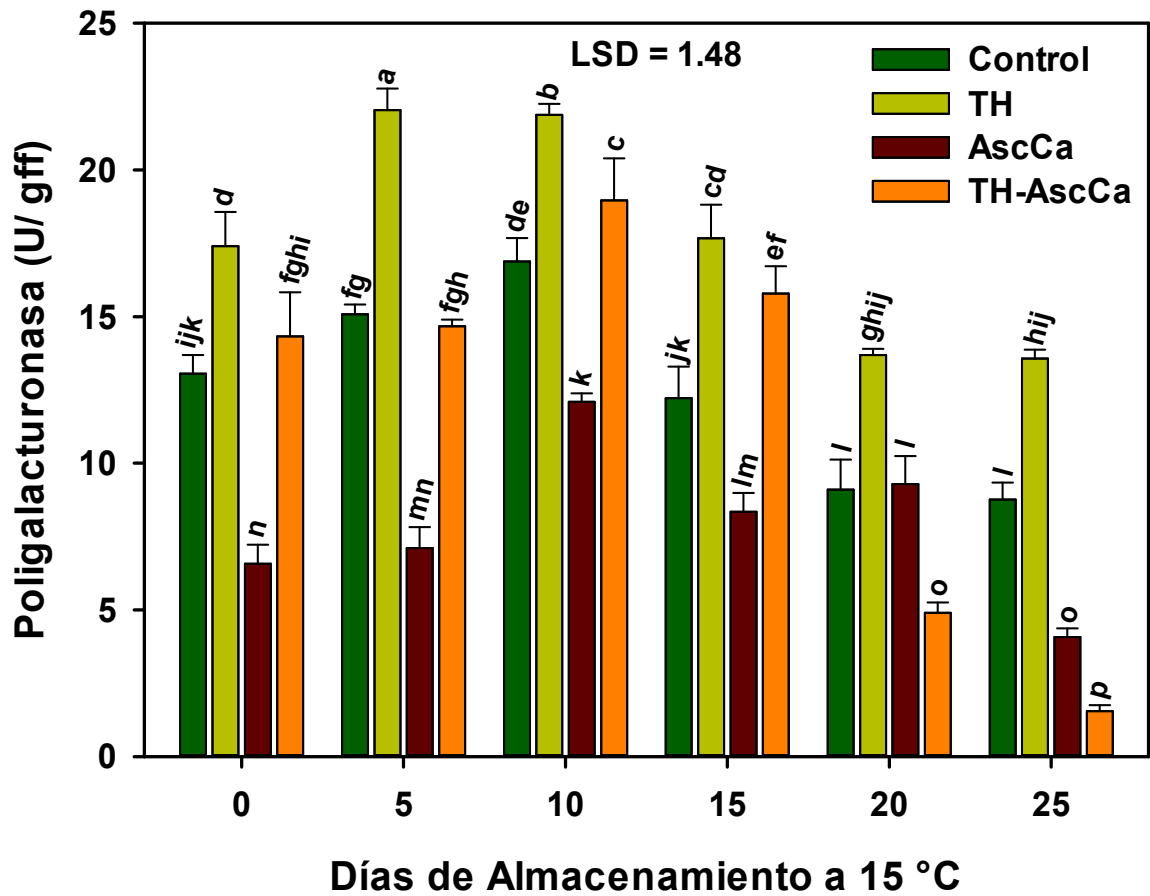


Figura 15. Actividad de la enzima poligalacturonasa (PG) en frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) y almacenados a 15 °C por un periodo de 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=6). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

disminución en la actividad de los frutos tratados con la combinación TH-AscCa ya que pasó de 15 a 5 U/g ff del día 15 al día 20 de almacenamiento. Al final del almacenamiento, los tratamientos con calcio fueron los que tuvieron los menores valores, presentando la combinación la actividad más baja. La disminución de la actividad de PG en los frutos tratados con la combinación podría deberse a una reestructuración de la lámina media de pectina al ser esta alterada por el efecto de los tratamientos, provocando la formación de estructuras que mantienen la rigidez de la pared celular como son los pectatos de calcio. Díaz-Corona y col (2020) evaluaron el impacto de un tratamiento TH-lactato de calcio en la actividad de las enzimas degradadoras de la pared celular en mango almacenado a temperatura de daño por frío, donde reportaron que la menor actividad de PG observada en el tratamiento con lactato de calcio se debió a que los iones Ca^{2+} se adhirieron a los grupos carboxilo de las pectinas para formar puentes con enlaces reticulados, lo que favorece a que la pared celular sea menos accesible para las enzimas degradadoras de pared celular, esto se podría deber al hecho de que PG hidroliza regiones de homogalacturonanos cuyos residuos de ácido galacturónico han sido previamente desmetilados por la enzima PME, es por esto que se generan cargas negativas, las cuales son necesarias para permitir la unión del calcio en la pared celular y así, poder llevar a cabo un mayor efecto sobre la firmeza del fruto (Chuni y col 2010).

Respecto a los resultados obtenidos en la aplicación del tratamiento hidrotérmico, Ketsa y col (1999) observaron que el TH (38°C por 3 días) aceleró el ablandamiento, pero inhibió el aumento de la actividad de PG en mango Nam Dokmai durante el almacenamiento a temperatura ambiente. Estos autores indican que el

ablandamiento del fruto del mango podría estar más relacionado con la actividad de otras enzimas pécticas que con el de PG en algunos cultivares.

En discrepancia con estos resultados, Silveira y col (2011) evaluaron el efecto de sales de calcio en combinación con un tratamiento hidrotérmico (60 °C x 1 min/ cloruro de calcio) para la conservación de la calidad de melón recién cortado, donde mostraron que la actividad de la enzima PG disminuyó ligeramente al cabo de 10 días de almacenamiento ratificando que la unión del calcio a los grupos carboxilo de la columna vertebral del homogalacturonano péctico y más específicamente en la laminilla media, puede proteger la columna vertebral péctica de la despolimerización mediada por la enzima PG, lo que explicaría por qué los tratamientos que retuvieron la firmeza fueron los de mayor contenido de calcio.

La temperatura también juega un papel importante en la reducción de la actividad de PG, como lo observaron Vicente y col (2005), en fresas tratadas térmicamente (45 °C, 3 h). Los resultados de este trabajo mostraron un efecto sinérgico de la temperatura y el calcio sobre la actividad de PG, al inicio del almacenamiento se presentó menor actividad, lo que podría deberse al tratamiento térmico, ya que hacia el final de la vida útil del fruto se presentó un aumento de actividad de PG en los tratamientos que mostraron mayor ablandamiento y menor contenido de calcio.

3. β - Galactosidasa (β - Gal)

En cuanto a los resultados obtenidos en la evaluación de la actividad de la enzima β -Gal, los frutos control y TH mostraron la mayor actividad a lo largo del almacenamiento, donde el TH alcanzó la mayor actividad en el día 20 de

almacenamiento con 3.26 U/g ff como se observa en la **Figura 16**, siendo ambos tratamientos con AscCa los que presentaron la menor actividad a lo largo del almacenamiento, donde ambos tuvieron fluctuaciones muy marcadas durante los 25 días de la duración del almacenamiento, siendo el TH-AscCa el que tuvo la actividad más baja (0.27 U/g ff) en el día 10, presentando diferencia significativa ($p > 0.05$) respecto al control y al TH durante todo el almacenamiento. Al final del almacenamiento (día 25), los tratamientos con calcio fueron los que tuvieron los menores valores, resaltando el tratamiento AscCa con la actividad más baja.

El aumento en la actividad de β -Gal propiciado por la aplicación de TH, podría deberse a que este tratamiento provocó un incremento en los transcritores de algunos genes de hidrolasas de la pared celular, incluyendo β -Gal durante el almacenamiento (Yimyong y col 2011). El incremento de esta enzima está asociado con el ablandamiento en el tejido de varios productos hortofrutícolas, como lo reportan Rahman y col (2011), quienes observaron este comportamiento en dos cultivares de mango almacenados a temperaturas de $-5, 4$ y 25 ± 2 °C. Otros autores también reportan que la actividad de β -Gal fue predominante en berenjena, y que dicha actividad incrementaba en paralelo con el ablandamiento del tejido de los frutos (Alkan y col 2022). Asimismo, se ha reportado que el almacenamiento a temperaturas bajas afecta la actividad de proteínas y enzimas de la pared celular, entre las cuales se encuentra β -Gal, provocando una menor actividad de estas enzimas, sin llegar a causar una inhibición total (Rugkong y col 2010). Todo lo anteriormente mencionado, coincide con el estudio realizado por Alkan y col (2022), donde ellos observaron resultados similares con la aplicación de un TH (45 °C por 45 y 60 s), ya que reportaron

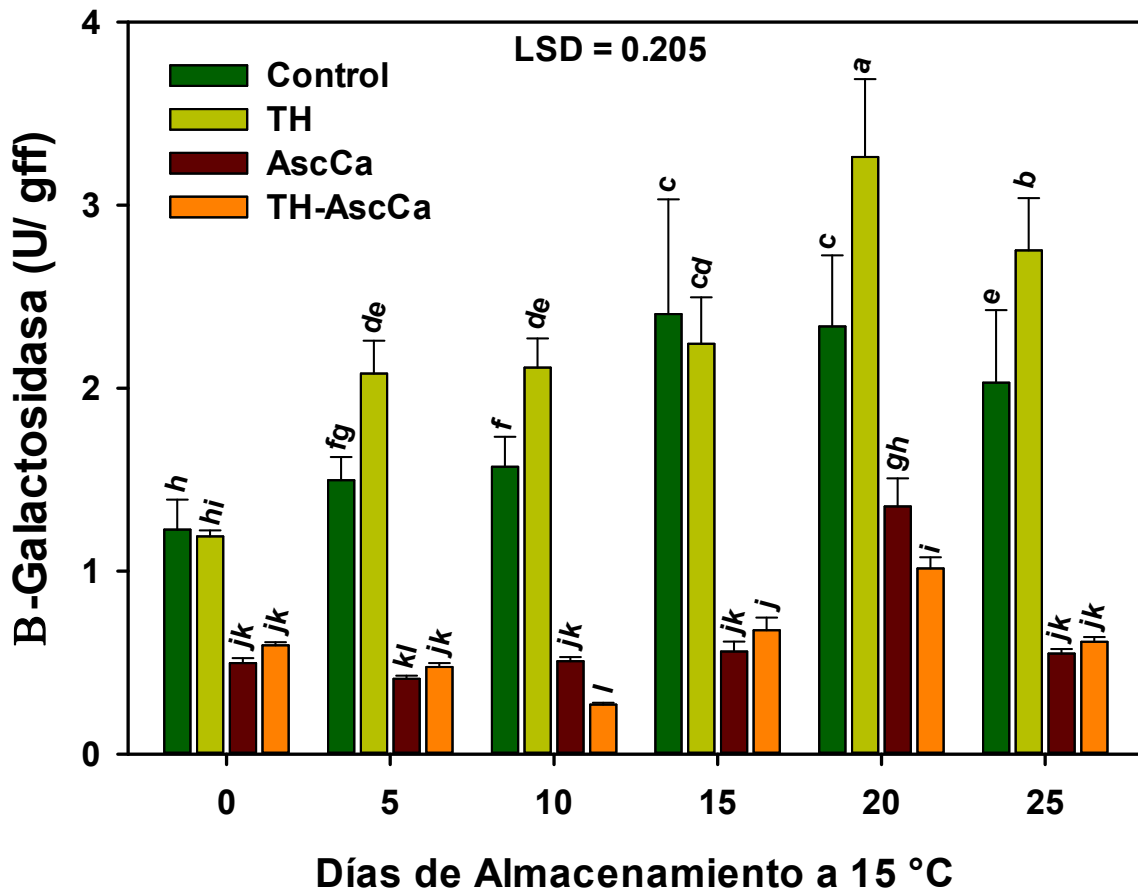


Figura 16. Actividad de la enzima β -Galactosidasa (β -Gal) en frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) y almacenados a 15 °C por un periodo de 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

un aumento constante a lo largo del almacenamiento (35 días) en frutos de berenjena, donde en general no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos y el control.

Por otro lado, los iones de calcio son un componente micromolecular fundamental de la pared celular de la célula, ya que inhiben la actividad de enzimas como α - y β -galactosidasa (Alkan y col 2022). Ortiz y col (2011) reportan en su estudio que la aplicación de calcio redujo la actividad de β -Gal durante la primera semana de almacenamiento a temperaturas bajas y este comportamiento se mantuvo durante toda su evaluación. Ellos mencionan que la inhibición parcial de la actividad de β -Gal en el fruto tratado con calcio podría haber retrasado la división de ramificaciones unidas al esqueleto de pectina y contribuido a la preservación de la fracción de pectina unida covalentemente.

Asimismo, Alkan y col (2022) mencionan en su estudio que, al aplicar concentraciones de 1.0, 2.0 y 3.0% de CaCl_2 la actividad de esta enzima sufrió una reducción en comparación con el control. Esta sal de calcio ayudó a la preservación de la pectina y causó degradación del calcio en los polisacáridos, por lo tanto, estos autores concluyeron que la aplicación de CaCl_2 contribuyó al mantenimiento de la integridad estructural de la pared celular.

D. CONTENIDO DE CALCIO

1. Contenido de calcio en cáscara

El contenido de calcio en cáscara de berenjena se presenta en la **Figura 17**, donde se observó un incremento para todos los tratamientos del día 0 al día 10, para

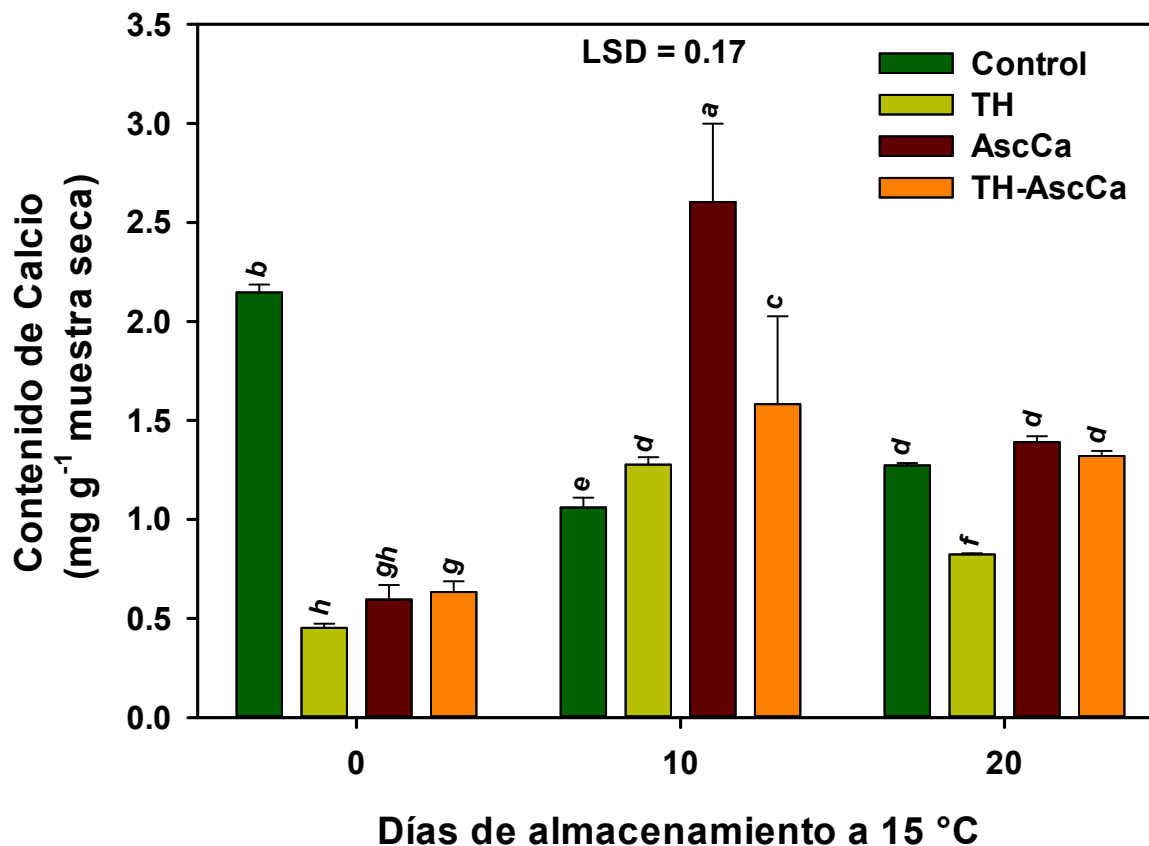


Figura 17. Contenido de calcio en cáscara de frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) y almacenados a 15 °C por un periodo de 20 días. Cada punto representa la media de 3 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=3). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

posteriormente ver una disminución significativa al día 20 para todos los tratamientos a excepción del control, el cual presentó valores muy altos en el día inicial (2.15 mg g⁻¹ muestra seca), los cuales disminuyeron para el día 10 (1.06 mg g⁻¹ muestra seca) y tuvieron un ligero aumento al final del almacenamiento (1.27 mg g⁻¹ muestra seca), aunque dicho aumento no fue significativo. Sin embargo, fue el tratamiento AscCa quien presentó los mayores valores (2.60 mg g⁻¹ muestra seca) en el día 10, presentando diferencia significativa ($p > 0.05$) con el resto de los tratamientos. Al final del almacenamiento los tratamientos con calcio (AscCa y TH-AscCa) y el control no presentaron diferencias significativas entre ellos, teniendo el TH el contenido de calcio más bajo (0.82 mg g⁻¹ muestra seca).

En cuanto a los resultados obtenidos durante esta investigación, el contenido tan elevado en el control, a diferencia del resto de los tratamientos podría deberse a que la exposición prolongada del resto de las muestras al medio acuoso (aplicación de tratamientos por 15 min) provocó en estas una modificación en el potencial de turgor, y por lo tanto, de la conducta estomática, lo cual limitó al principio del almacenamiento la absorción del calcio hacia la célula en los tratamientos (TH, AscCa y TH-AscCa).

Sin embargo, a partir del día 10, se muestra en la **Figura 17** como las hortalizas con el tratamiento AscCa aumentaron de manera significativa su contenido de calcio. En los últimos años, se ha reportado que la aplicación de calcio poscosecha mantiene la calidad de los productos hortofrutícolas (Li y col 2020; Xiong y col 2021). Autores como Wang y col (2014), reportaron en sus investigaciones que el tratamiento con calcio exógeno aumentaba la firmeza en cerezas. Asimismo, otros autores encontraron

que el agregar un 4.0% de Ca^{2+} puede mejorar la calidad poscosecha y la vida útil de plátanos (Elbagoury y col 2021). Todo esto ocurre ya que, se ha reportado que el calcio actúa como segundo mensajero por lo que tiene una función positiva hacia el estrés abiótico, incluido el estrés por sequía, frío, calor y daño oxidativo (Aldon y col 2018; Ban y col 2021).

El incremento en el día 10 de almacenamiento para el tratamiento AscCa en particular estaría sugiriendo que el calcio exógeno estaría disponible para enlazarse a la epidermis, incorporándose de esta manera dentro de la matriz de la pared celular (Madani y col 2016). De igual manera, los tratamientos con temperaturas altas combinados con calcio tienen un efecto significativamente positivo sobre la fijación del calcio en el tejido de los productos hortofrutícolas, el cual es determinante en la reducción del ablandamiento. Dichos efectos han sido previamente explicados en este trabajo en términos de la activación de las enzimas degradadoras de pared celular (PME, PG y β -Gal), las cuales favorecen la incorporación del calcio exógeno, ya que, su activación debido a la aplicación de temperaturas altas, estaría incrementando la difusión del calcio, especialmente a través de los apoplastos; de igual forma estarían incrementando la solubilidad de las sales de calcio en los tejidos vegetales (Silveira y col 2011). Además, García-Serrano y col (2020) aplicaron diferentes sales de calcio en aceitunas negras, encontrando mayor contenido de estas sales en los frutos tratados, lo cual estaría indicando que la absorción de calcio puede ocurrir sin el uso de un tratamiento hidrotérmico (López-Velázquez y col 2020).

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Silveira y col (2011), en melón fresco cortado, quienes al aplicar una combinación de TH-CaCl₂ observaron un mayor contenido de calcio libre y ligado respecto a los frutos control. Asimismo, la inmersión de fresas en una solución de CaCl₂ al 1.0% provocó un incremento en el contenido de calcio de los frutos, el cual fue mejorado una vez que se aplicó calor a 45 °C, ya que este mejoró la penetración de los iones de calcio dentro de los frutos (García y col 1996). Hemmaty y col (2007), mencionan en su estudio que los tratamientos por inmersión en agua caliente podrían estar alterando la membrana celular, incrementando así la infiltración activa de sustancias como minerales hacia el interior de los frutos. Es importante mencionar que existen otros factores que podrían favorecer la absorción de calcio en los frutos, tales como factores ambientales, fisuras en la superficie, presencia de estomas, lenticelas y otras superficies irregulares (Madani y col 2016).

2. Contenido de calcio en pulpa

En cuanto a los resultados obtenidos en la evaluación del contenido de calcio en pulpa, podemos observar en la **Figura 18**, que el control tuvo el mayor contenido en el día 0 con 3.24 mg g⁻¹ muestra seca, aunque dicho valor sufrió una disminución considerable para los siguientes días de almacenamiento. En cuanto al TH se refiere, no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) respecto a los tratamientos con calcio durante todo el almacenamiento a excepción del día 10. Asimismo, los tratamientos AscCa y TH-AscCa no tuvieron grandes variaciones durante todo el experimento, observándose que el TH-AscCa presentó valores constantes durante todo el almacenamiento.

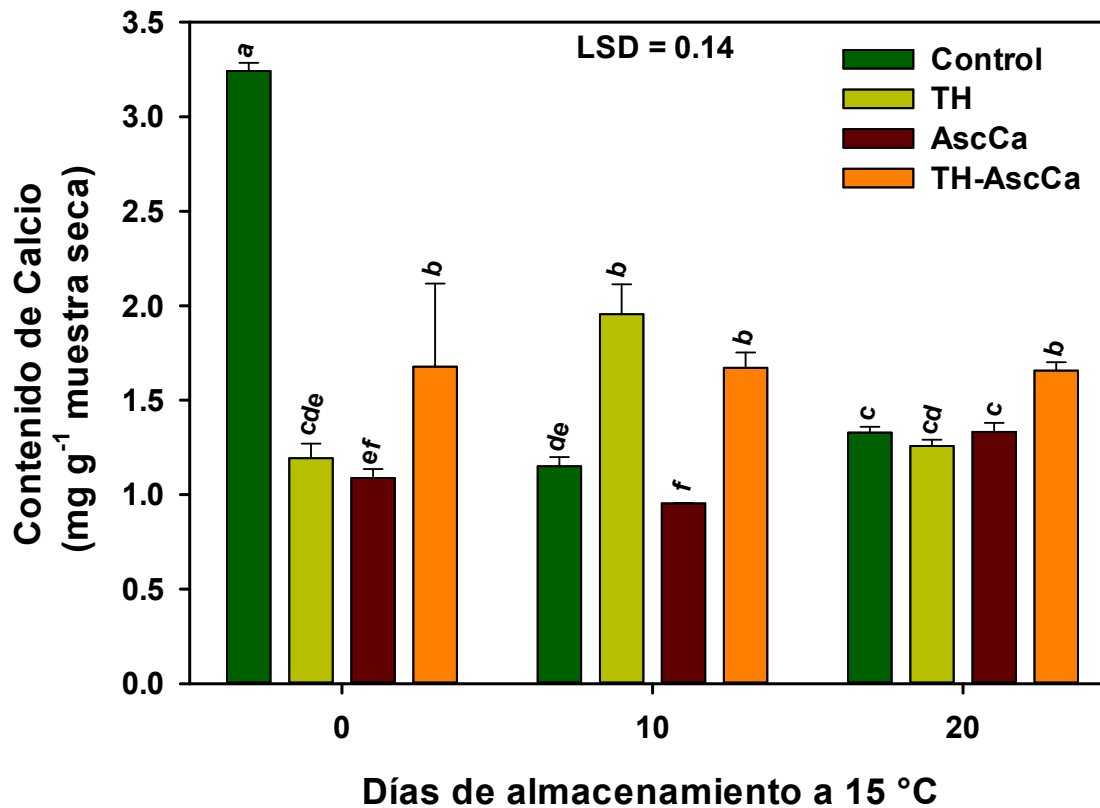


Figura 18. Contenido de calcio en pulpa de frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) y almacenados a 15 °C por un periodo de 20 días. Cada punto representa la media de 3 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=3). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

En este trabajo se observó que las concentraciones de calcio de manera general fueron ligeramente más elevadas en cáscara respecto a la pulpa de las berenjenas, esto se debe que al ser la cáscara la capa más externa de la fruta es la primera que se ve expuesta a la aplicación de AscCa y por consiguiente adquiere la mayor concentración del mismo. Awang y col (2011) reportaron en frutos de pitahaya que la aplicación de calcio en dichos frutos, provocó un gradiente de concentración a través de los frutos, lo cual incitó a que el calcio se transportara de manera pasiva hacia el interior de la fruta, por lo que al igual que en esta investigación, estos autores reportaron un mayor contenido de calcio en cáscara respecto a la pulpa.

En el estudio realizado por Ban y col (2021), se observó que la aplicación de un tratamiento de CaCl_2 al 3.0 y 4.0% provocó una disminución en el oscurecimiento en pulpas de berenjenas para el día seis de almacenamiento, esto aunado al mantenimiento en los niveles de calcio, indicando así que el efecto de la aplicación de calcio exógeno en diversos frutos es dependiente de la dosis, ya que efectos negativos fueron observados en la aplicación de concentraciones mayores. Como mensajero secundario, el calcio transmite señales recibidas desde la superficie celular, hasta su interior, cambiando la concentración citoplasmática, participando así en múltiples procesos celulares, los cuales son decodificados por una serie de sensores de Ca^{2+} (Ranty y col 2016).

En condiciones normales, la concentración de calcio intracelular puede controlarse mediante un mecanismo de entrada y salida de calcio de la membrana celular, pero una dosis alta de calcio afectaría el equilibrio de la entrada y salida de este mineral, lo que estaría llevando a un desorden en el calcio intracelular. Dichos

desordenes no controlados estarían conduciendo en última instancia al daño celular (Kudla y col 2010; Steinhorst y Kudla 2014).

Nuestros resultados coinciden con los obtenidos por Ayón-Reyna y col (2017), quienes observaron que la aplicación de un TH-CaCl₂ en frutos de papaya, incrementó el contenido de calcio en pulpa, estos autores discutieron que la combinación de sales de calcio logró alterar la membrana celular e incrementó la filtración de minerales y las interacciones con la pectina, aunque en dicho estudio, no se obtuvieron los niveles tan elevados presentes en este estudio en cuanto al tratamiento control. Al contrario de este estudio, Sharma y col (2013) observaron un mayor contenido de calcio en pulpa de frutos de manzana tratados con una combinación de TH-CaCl₂, respecto al resto de los tratamientos, sugiriendo un efecto sinérgico entre el TH y la sal de calcio.

Se observó que el contenido de calcio durante esta investigación fue constante para el TH-AscCa en frutos de berenjena durante todo el almacenamiento, lo cual sugiere que el calcio exógeno penetró la epidermis del fruto y logró incorporarse en la pared celular de los frutos (Madani y col 2014).

E. DETERMINACIÓN DEL DAÑO EN LA ESTRUCTURA CELULAR

1. Microscopía óptica

Se llevó a cabo un análisis de la estructura celular de los tratamientos control, TH, AscCa y la combinación TH-AscCa en frutos de berenjena, mediante microscopía óptica (**Figura 19**), donde todas las muestras histológicas del tejido mostraron al día 5 un epicarpio y mesocarpio con paredes celulares bien definidas, con excepción del

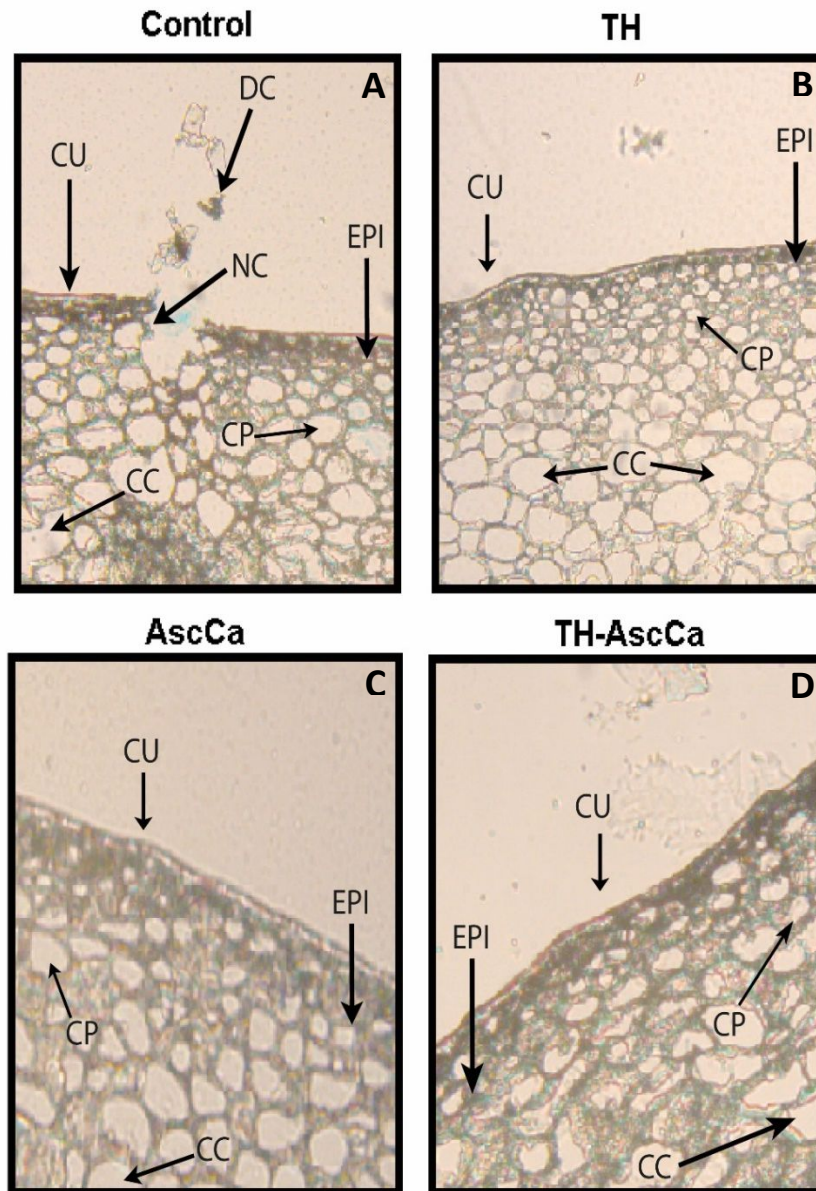


Figura 19. Fotografía de microscopía óptica de tejido de epicarpio y mesocarpio de frutos de berenjena control (A) y tratados con un tratamiento hidrotérmico (TH) (B), ascorbato de calcio (AscCa) (C) y su combinación (TH-AscCa) (D) al día 5 de almacenamiento a una ampliación de 100X. EPI-Epicarpio; CU-Cutícula; CC-Células de colénquima; CP-Células de parénquima; DC-Deformidades en la Cutícula; NC-Necrosis celular.

control, el cual mostró un claro rompimiento en la cutícula, con la aparición de áreas necróticas y algunos residuos de la misma.

Autores como Madani y col (2016), observaron un mayor grosor de las paredes celulares en frutos de papaya al ser tratados con calcio en comparación con otros tratamientos y frutos control, mostrando que existe una correlación entre una mayor concentración de calcio y un mayor grosor de la pared celular. Asimismo, es importante mencionar que el calcio juega un papel primordial en la adhesión célula-célula, el cual es trascendental para conservar la firmeza de los frutos, ya que el colapso de la integridad del tejido en conjunto con la separación de las células estaría derivando en la formación de espacios intercelulares (Madani y col 2016).

Al día 20 de evaluación las capas de la cutícula y las células epidérmicas de las muestras de los frutos con los tratamientos con calcio se mostraron intactas (**Figura 20**). Tanto el tratamiento AscCa como TH-AscCa presentaron buena definición y estructura de las paredes celulares, así como poca deformidad de la cutícula en comparación con los tratamientos control y TH.

Por otro lado, las muestras de los frutos no tratados y tratados con TH presentaron una evidente ruptura de la cutícula y de las células epidérmicas, esto en el caso del control debido al proceso normal de senescencia del fruto y en el caso del TH por la aplicación de calor. La cutícula actúa como la principal barrera para la pérdida de humedad, por lo que el mantener una cutícula estructuralmente intacta y sin deformidades juega un papel crítico en la calidad de la fruta y la vida útil poscosecha,

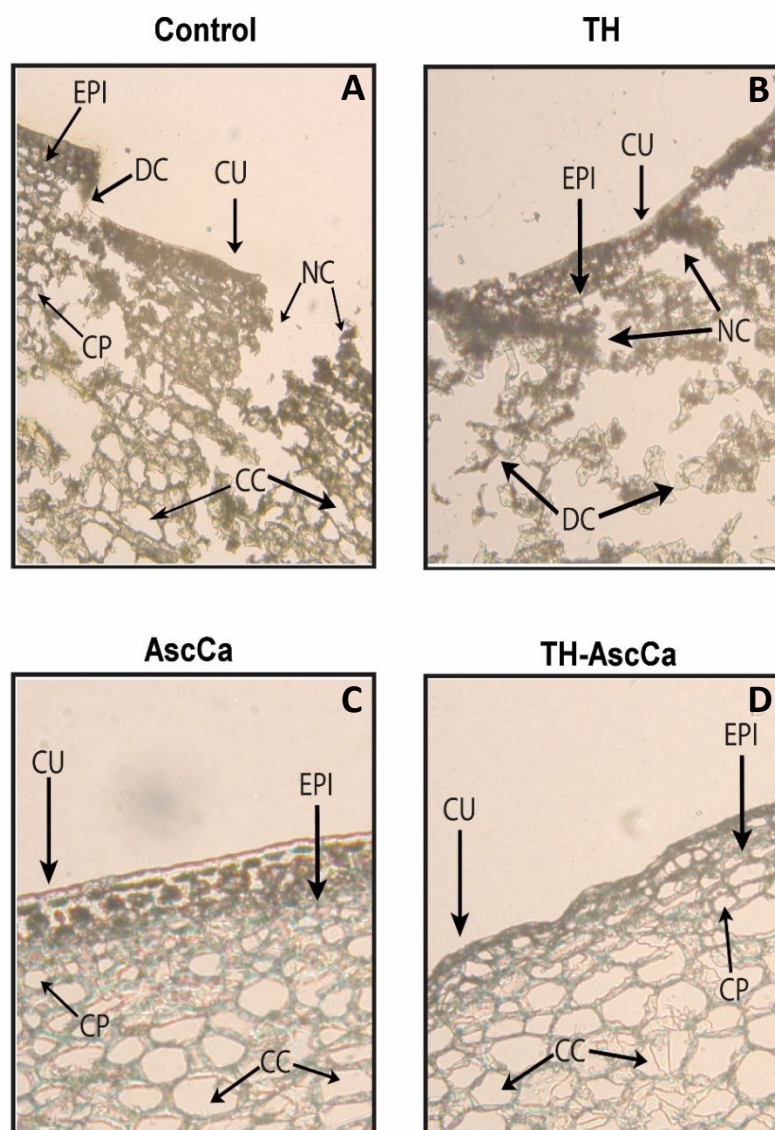


Figura 20. Fotografía de microscopía óptica de tejido de epicarpio y mesocarpio de frutos de berenjena control (A) y tratados con un tratamiento hidrotérmico (TH) (B), ascorbato de calcio (AscCa) (C) y su combinación (TH-AscCa) (D) al día 20 de almacenamiento a una ampliación de 100X. EPI-Epicarpio; CU-Cutícula; CC-Células de colénquima; CP-Células de parénquima; DC-Deformidades en la Cutícula; NC-Necrosis celular.

dado que son factores clave para limitar la deshidratación, infección microbiana y lixiviación (Martin y Rose 2014).

Para el día 20 de almacenamiento se observó que se había perdido en su totalidad la estructura de las capas de parénquima y colénquima en el TH y parcialmente en el control, observándose claramente la presencia de vesículas redondas y ovaladas en los tratamientos con calcio (AscCa y TH-AscCa). Lo cual, según Ayón-Reyna y col (2018), podría deberse a que la síntesis y acumulación de compuestos fenólicos y lignina dentro de las vesículas fueron inducidas por el estrés que ocasionó el calor, ya que este último juega un papel muy importante en la activación de la síntesis y acumulación de compuestos fenólicos, lo cual hemos podido confirmar en este estudio. Ya que, aquellos tratamientos en los cuales se observó que se conservó de mejor manera la estructura celular (AscCa y TH-AscCa), fueron los que presentaron los valores más altos de firmeza, así como un menor IO y menor actividad de las enzimas degradadoras de pared celular.

Asimismo, ha sido reportado que elevadas concentraciones de calcio en el citosol estimula mecanismos de resistencia endógena, tales como la síntesis de fitoalexinas y compuestos fenólicos (Miceli y col 1999; Madani y col 2014). En este sentido, Sharma y col (2013) reportaron menores niveles de compuestos fenólicos en manzanas no tratadas que en frutas tratadas con TH-Ca. Basilio-Heredia y Cisneros-Zevallos (2009) también reportaron que el calor provocó estrés en los frutos y activó la síntesis de compuestos fenólicos. Además, otros estudios han mostrado que tratamientos con agua caliente aumentaron la expresión de enzimas estructurales de ruta de biosíntesis de compuestos fenólicos (Spadoni y col 2014). En este trabajo, el

tratamiento hidrotérmico en combinación con ascorbato de calcio pudo haber inducido la síntesis de compuestos fenólicos, pero no su oxidación, ayudando a reducir el área dañada en la pared celular de frutos de berenjena, manteniendo la integridad de la pared celular y estructura de orgánulos y una mayor firmeza en los frutos.

Además, Russo y col (2012) reportan que en frutos de berenjena a los que se les aplicó un tratamiento de aire caliente (40, 50, 60 y 70 °C) presentaron un mayor daño estructural en los frutos a los que se les aplicó la mayor temperatura, lo cual atribuyeron a la ocurrencia de reacciones químicas (que dependen en gran medida de la temperatura del proceso) que modifican profundamente la estructura provocando el endurecimiento y el consiguiente daño. De igual forma, Uchida y col (2017) reportaron en frutos de berenjena que a mayor temperatura del tratamiento con calor se observó con frecuencia que los enlaces entre las paredes celulares se alargaban y adelgazaban, ellos mencionaron que dichos resultados podrían explicar que la aplicación de temperaturas altas ablandó las paredes celulares debido a la eliminación de pectina β .

F. ENZIMAS OXIDATIVAS

1. Polifenol oxidasa (PPO)

La enzima polifenol oxidasa presentó un aumento constante a lo largo del almacenamiento (**Figura 21**), en donde el control siempre contó con los valores más altos, mostrando diferencia significativa ($p>0.05$) en todo momento respecto al resto de los tratamientos, presentando el pico máximo de actividad general el día 25 con 0.17 $\mu\text{mol}/\text{mg min}$. En cuanto al TH, este mostró un aumento constante durante los 25

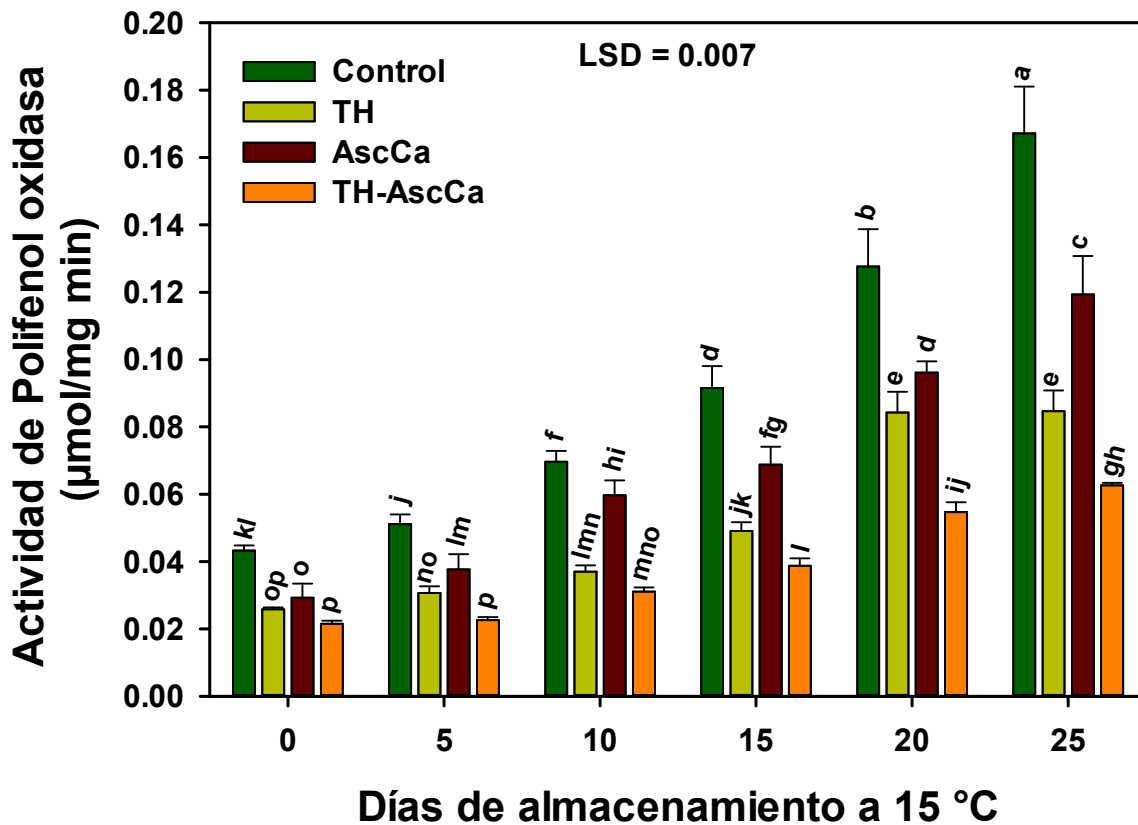


Figura 21. Actividad de la enzima polifenol oxidasa (PPO) en frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) y almacenados a 15 °C por un periodo de 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=3). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

días de almacenamiento, presentando valores más elevados respecto a la combinación (TH-AscCa), pero menores al resto de los tratamientos. Para el tratamiento AscCa se observó un comportamiento similar al del control, aunque en menores valores, este comportamiento se replicó para el tratamiento TH-AscCa, el cual presentó los menores valores en cada uno de los días de almacenamiento, siendo el más bajo en el día 0 con 0.22 $\mu\text{mol}/\text{mg min}$.

Los resultados obtenidos podrían deberse a que el TH promovió un menor estrés oxidativo, lo cual estaría modificando las cantidades de antioxidantes y promoviendo la tolerancia al estrés en los productos hortofrutícolas (Önder y col 2021). Resultados similares fueron previamente reportados en berenjenas a las cuales se les aplicó diferentes tratamientos térmicos (vapor, microondas y hervido), donde se observó un incremento en la cantidad de compuestos fenólicos comparado con los frutos sin tratar, así como una reducción en la actividad de la enzima PPO, la cual es responsable de la oxidación de los compuestos fenólicos (Chumyam y col 2013).

Nuestros resultados coinciden con los obtenidos por Yildiz y Aadil (2021), quienes observaron que la actividad de PPO en mango en todos los tratamientos aplicados (ultrasonido de alta intensidad, agentes anti oscurecimiento: $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ y CaCl_2 ; y un tratamiento hidrotérmico (65 °C por 5 min)) sufrió un aumento significativo a medida que avanzaron los días de almacenamiento, especialmente en los frutos control. Ya que, mientras la actividad de PPO fue muy baja en el día cero, se presentaron grandes aumentos en su actividad en los días siete y catorce de almacenamiento, siendo la actividad más alta detectada en el último día de almacenamiento.

En el estudio realizado por Aguiar-Cipriano y col (2015), observaron que un tratamiento de precalentamiento en camote morado aumentó significativamente el rendimiento de polifenoles de una manera dependiente de la temperatura, lo cual coincide con el ablandamiento del tejido y la inactivación de la enzima PPO. Ya que, se ha reportado que los tratamientos térmicos con temperaturas que alcanzan hasta los 105 °C logran inactivar las enzimas oxidasas, esto considerando que la actividad óptima de enzimas como PPO está cerca de los 40 °C (Yoruk y Marshall 2003).

Ban y col (2021) reportaron que el tratamiento con CaCl_2 (1.0%, 2.0%, 3.0% y 4.0%) redujo la aparición de las manchas marrones en peras almacenadas en frío, lo que asociaron con la inhibición en la actividad de las enzimas PPO y POD, retrasando así las pérdidas de compuestos fenólicos. Este retraso en el oscurecimiento del fruto, podría deberse a que al haber una menor actividad de la enzima PPO, esta estaría catalizando un menor número de compuestos fenólicos en quinonas, las cuales son altamente reactivas por su facilidad de ser oxidadas (González y col 2019). Asimismo, Jiang y col (2013) mencionan en su estudio que al aplicar calcio (25 mM) en frutos de tomate, la actividad de PPO aumentó significativamente después de 6 h respecto al control.

Autores como Abreu y col (2003) propusieron que el efecto benéfico del TH en los primeros días de almacenamiento sobre el oscurecimiento oxidativo en peras mínimamente procesadas está relacionado con una reducción en la actividad de PPO. Asimismo, nuestra investigación coincide con lo reportado por López-López y col (2013), quienes observaron que después del día 10 de almacenamiento se presentó un incremento constante en la actividad de PPO en manzana mínimamente procesada

y tratada con TH (45 °C por 10 min) y TH-CaCl₂, observándose de esta manera diferencias significativas respecto al resto de los tratamientos, lo cual estaría indicando que la enzima no fue inhibida por completo al aplicarle el TH.

2. Peroxidasa (POD)

E la **Figura 22** se muestra un incremento constante de la actividad de la enzima POD para todos los tratamientos hasta el día 15 de almacenamiento, seguido de una ligera disminución que se mantuvo constante para los días 20 y 25 a excepción del control, siendo este último quien mostró los mayores valores en todos los días de almacenamiento respecto al resto de los tratamientos, alcanzando su actividad máxima el día 15 con 0.071 $\mu\text{mol}/\text{mg min}$, seguido por el tratamiento AscCa, el cual mostró un comportamiento muy parecido al control, pero con valores menores y diferencia significativa ($p>0.05$) respecto a este. En cuanto a los tratamientos a los cuales se les aplicó un TH (TH y TH-AscCa), mostraron los menores valores a lo largo del almacenamiento, teniendo fluctuaciones a lo largo del mismo; sin embargo, fue el TH-AscCa el que presentó el menor valor en el día 5 (0.029 $\mu\text{mol}/\text{mg min}$). La enzima PPO es mayormente relacionada con el oscurecimiento de diversos frutos, por lo tanto, la contribución que tiene en este fenómeno la enzima POD podría resultar relevante (López-López y col 2013).

Los resultados obtenidos en este trabajo, coinciden con aquellos encontrados por Kou y col (2015) quienes reportaron que la actividad de POD en frutos de pera tratados con calcio exógeno eran significativamente mayores que los frutos control. En frutas y hortalizas frescas, las actividades más elevadas de las enzimas antioxidantes

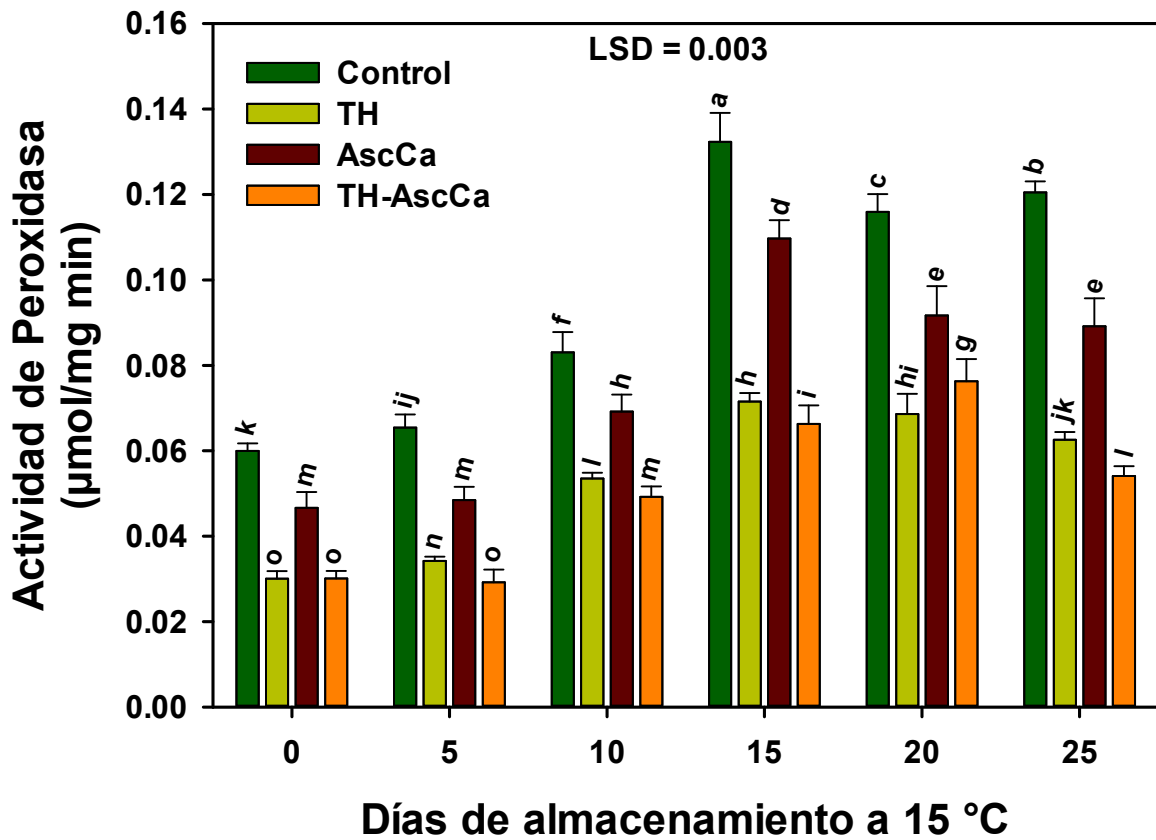


Figura 22. Actividad de la enzima Peroxidasa (POD) en frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) y almacenados a 15 °C por un periodo de 25 días. Cada punto representa la media de 3 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=3). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

pueden inhibir la acumulación de especies reactivas de oxígeno (EROs), estabilizar la membrana celular y reducir la oxidación fenólica por EROs (Li y col 2020; Moon y col 2020). Por lo tanto, el menor nivel resultante de EROs puede provocar un retraso en el oscurecimiento de diversos productos hortofrutícolas. Asimismo, en el estudio realizado por Ban y col (2021) se observó una menor acumulación de H_2O_2 y O_2 en las frutas tratadas con calcio que en el resto de los tratamientos durante el almacenamiento. Además, las actividades de los antioxidantes enzimáticos catalasa, POD y superóxido dismutasa que eliminan EROs fueron significativamente mayores en las frutas tratadas con calcio en comparación con el control. Estos resultados indicaron que el calcio puede elevar el sistema de eliminación de EROs para proteger las células del daño oxidativo.

Sin embargo, nuestros resultados discrepan con los obtenidos por autores como Lamikanra y Watson (2007) en melón calentado a 60 °C por 60 min, ya que ellos encontraron que la combinación del tratamiento con agua caliente y la inmersión en calcio favorecía a un aumento en la actividad de POD en comparación con los frutos control. Aun así, el rol de la enzima POD en el oscurecimiento enzimático se mantiene cuestionado, la producción de H_2O_2 durante la oxidación de algunos compuestos fenólicos catalizados por PPO podría sugerir un posible efecto sinérgico entre PPO y POD, lo que implicaría el involucramiento de la POD en el proceso de oscurecimiento (López-López y col 2013).

G. COMPUESTOS FENÓLICOS

1. Compuestos fenólicos totales

Se llevó a cabo un análisis del contenido de compuestos fenólicos totales (CFT), los cuales se muestran en la **Figura 23**, donde al inicio del almacenamiento (día 0) se registró un mayor contenido de CFT para todos los frutos tratados (TH, AscCa y TH-AscCa) en comparación con el control, siendo el tratamiento AscCa el que presentó el mayor contenido de CFT (20.94 mg EAG/g EM). A partir del día 5 de almacenamiento se registró una disminución significativa ($p > 0.05$) general en el contenido de compuestos fenólicos (CF) para todos los tratamientos, a excepción del tratamiento AscCa, el cual tuvo un ligero aumento en los días 15 y 20 de almacenamiento para posteriormente sufrir una disminución en el día final (día 25). Por otra parte, fue el tratamiento AscCa el que presentó los menores valores de contenidos de CFT a lo largo del almacenamiento, registrando el día 25 la menor concentración (3.90 mg EAG/g EM). Sin embargo, fue el TH-AscCa el que presentó el comportamiento más errático a lo largo del almacenamiento, con marcadas fluctuaciones, teniendo un aumento constante del día 5 hasta el día 20 de almacenamiento, y presentando una disminución al final del mismo.

Los compuestos fenólicos en frutas y hortalizas contribuyen a la ingesta de antioxidantes y se ha mencionado que poseen acción protectora para la salud del ser humano, asimismo, se ha reportado que los CF tienen la capacidad de disminuir o incrementar su contenido en productos hortofrutícolas dependiendo de las condiciones

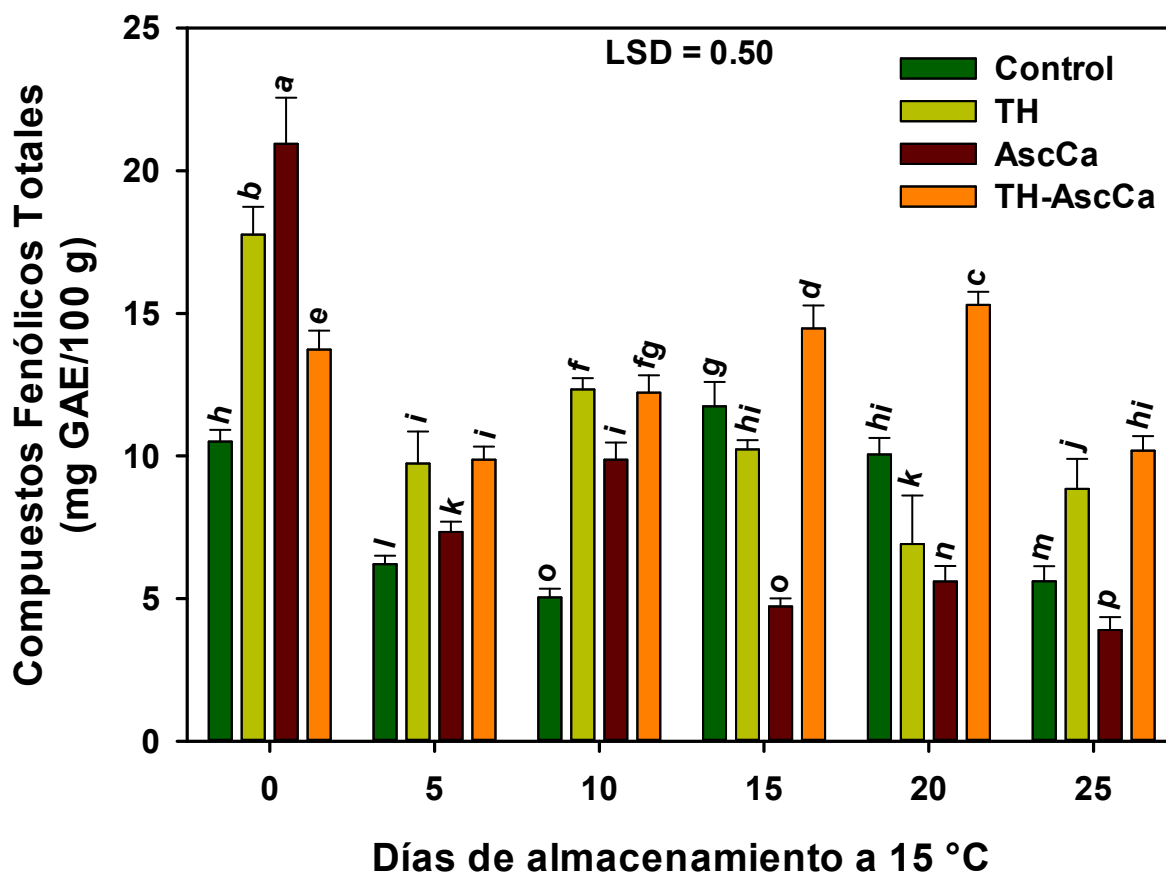


Figura 23. Contenido fenólico total en frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) y almacenados a 15 °C por un periodo de 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=6). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

de almacenamiento, como es este mismo en frío; así como la aplicación de tratamientos físicos y químicos (Utami y col 2018).

El alto contenido de CF obtenido para el día 0 de almacenamiento podría ser resultado de la generación de un estrés moderado en el fruto, debido a la aplicación de tratamientos, lo cual causó la activación del sistema antioxidante enzimático y la síntesis de los CF (Díaz-Corona y col 2024). Resultados similares fueron reportados en berenjena tratada con calor (vapor, ebullición y microondas) donde se reportó un incremento en el contenido de CF, así como una reducción en la actividad de la enzima PPO (enzima responsable de la oxidación de los CF) (Chumyam y col 2013), todo esto comparado con el control. Asimismo, como ya se ha mencionado, los metabolitos secundarios presentes en los tejidos vegetales, como son los CF, poseen propiedades antioxidantes, lo cual estaría propiciando que estos compuestos sean capaces de contrarrestar el estrés oxidativo, y de esta manera generar beneficios a la salud (Haider y col 2023; Díaz-Corona y col 2024).

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Kaur y col (2014), quienes reportan que el uso de un TH, AscCa y su combinación resulta eficaz para incrementar el contenido de CF al inicio del almacenamiento. También coinciden con los obtenidos en rodajas de manzanas tratadas con AscCa (Aguayo y col 2015) y en berenjena tratada hidrotérmicamente (Chumyam y col 2013), donde el incremento de los CF provocó una reducción en la actividad de la enzima PPO. Estos resultados podrían deberse a que la aplicación de un tratamiento con agua caliente con AscCa es efectivo para retrasar los procesos fisiológicos en los frutos, además, el AscCa es altamente eficiente retrasando la aparición del oscurecimiento en los frutos, debido a su alto

efecto antioxidante; además, el uso de sales de calcio logra mantener una mayor integridad de la pared celular, evitando así el deterioro acelerado de la célula, por lo que genera mayor integridad en las vacuolas, las cuales almacenan a los CF y participan en el oscurecimiento de los frutos de berenjena (Turmanidze y col 2017; Ban y col 2021). En estudios previos, la aplicación exógena de calcio retrasó el oscurecimiento del pericarpio de peras almacenadas en temperaturas bajas, lo que podría resultar del incremento del contenido endógeno de ácido γ -aminobutírico (GABA), genes de expresión relacionados con GABA, y actividad enzimática (Li y col 2020).

López-Velázquez y col (2020) reportaron que al pasar los días de almacenamiento los frutos de chile morrón a los que se les aplicó un TH (53 °C por 1, 2 y 3 min) mostraron un ligero incremento en su contenido de ácido hidroxicinámico conforme avanzaron los días de almacenamiento. Estos autores mencionaron que el alto contenido de ácidos hidroxicinámicos sugiere que la aplicación de un TH induce la acumulación de compuestos fenólicos. Respecto a estos resultados, autores como Luengwilai y col (2012) reportaron que ácidos hidroxicinámicos tales como el ácido clorogénico y sus derivados han sido asociados a la exposición a estrés abiótico en algunas solanaceas.

2. Contenido total de antocianinas

Los resultados para el contenido total de antocianinas (CTA) se muestran en la **Figura 24**. En el día inicial de almacenamiento, todos los frutos sometidos a tratamientos mostraron una reducción en comparación con el control, siendo el TH el

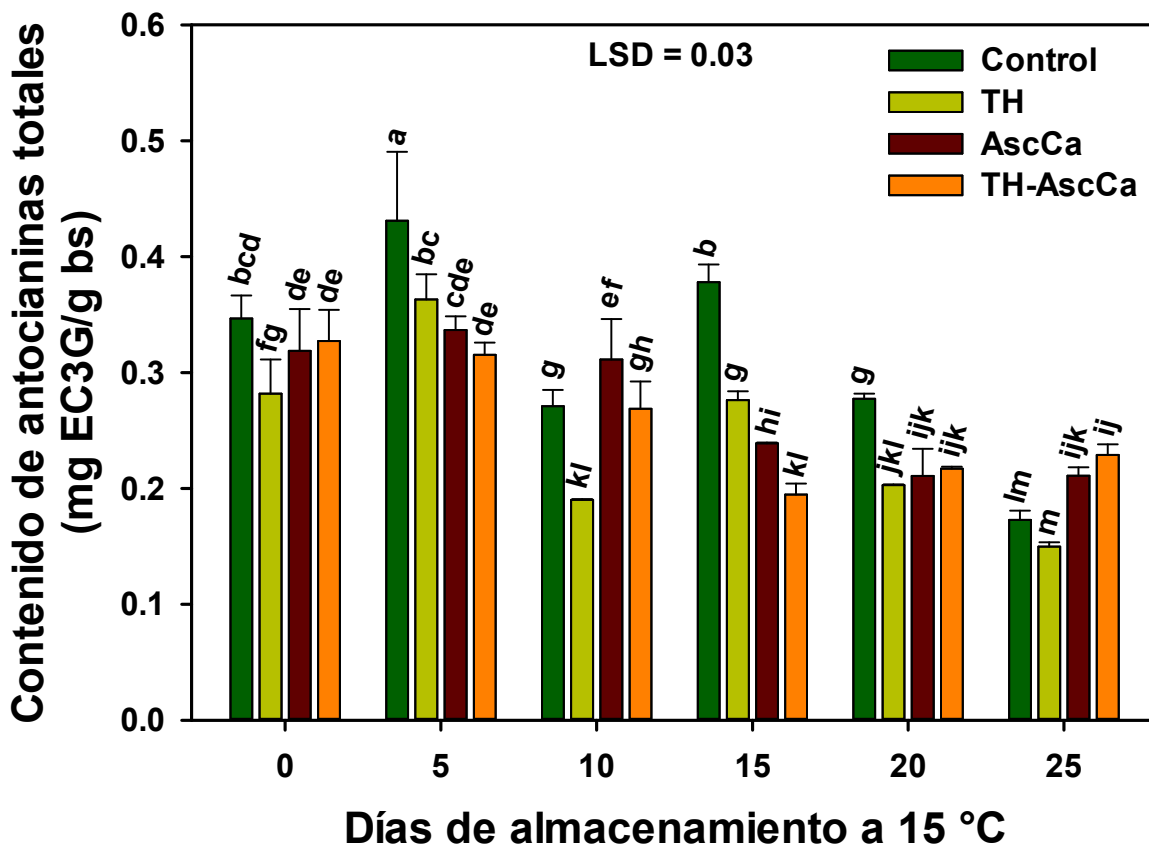


Figura 24. Contenido total de antocianinas en frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) y almacenados a 15 °C por un periodo de 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=6). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

que mostró el menor contenido, mostrando diferencias significativas respecto al control ($p > 0.05$). Siendo este último mencionado, quien mantuvo los mayores niveles de CTA durante la mayoría del almacenamiento (días 0, 5, 15 y 20) respecto al resto de los tratamientos. En general, se presentó una variabilidad en el CTA para todos los tratamientos durante el almacenamiento, aun así, se pudo observar una disminución constante para todos ellos. El TH presentó los menores contenidos en los días 10 y 25 de almacenamiento, siendo el día 25 el contenido más bajo con 0.15 mg EC3G/g bs. Es importante mencionar que a partir del día 15 de almacenamiento la combinación TH-AscCa mostró ligeras variaciones, las cuales no presentaron diferencias significativas entre el mismo tratamiento. Lo cual nos demuestra que el contenido total de antocianinas fue afectado por los tratamientos aplicados durante este estudio.

Lo anteriormente mencionado podría deberse a que la aplicación de temperatura ha demostrado ser un factor crucial en la degradación de antocianinas, la cual incrementa en proporción al aumento en temperatura. Los tratamientos con agua caliente por inmersión causan una mayor pérdida en el contenido de antocianinas respecto a otros tratamientos térmicos, ya que al estar involucrada la aplicación de agua, resulta en una mayor disolución de antocianinas, las cuales son fácilmente degradadas debido a que son compuestos hidrosolubles (Zhang y col 2020; Díaz-Corona y col 2024). Este mismo comportamiento fue previamente reportado en cáscara de berenjena cuando fue evaluado el CTA y su capacidad antioxidante a la cual se le aplicaron diversos tratamientos con calor como hervido y vapor (Zhang y col 2020), así como horneado, fritura y a la plancha (Arkoub-Djermoune y col 2016), ya que las temperaturas y tiempo de exposición fueron muy elevados. La degradación de

las antocianinas en diversos productos hortofrutícolas podría estar afectada por factores endógenos y exógenos, tales como la interacción con otros compuestos fenólicos, interacción con proteínas y carbohidratos, así como la presencia de luz y oxígeno, cambios en el pH, iones metálicos, entre otros (Arkoub-Djermoune y col 2016; Zhang y col 2020).

Asimismo, en el estudio realizado por Condurache y col (2021) fue reportado que la degradación de las antocianinas en cáscara de berenjena, así como su capacidad antioxidante, siguen una cinética de reacción de primer orden, lo cual estaría permitiendo una predicción precisa de los parámetros cinéticos de su degradación térmica. En este estudio, los parámetros cinéticos y termodinámicos evaluados demostraron que el aumento de la temperatura, tiende a acelerar la degradación de antocianinas.

Resultados similares fueron encontrados por Harakotr y col (2014), donde reportaron que el hervir y aplicar vapor provocó una gran pérdida en el CTA de maíz glutinoso. De igual manera, ha sido reportado que la cocción a vapor de camote, redujo el contenido de antocianinas a casi la mitad de su contenido original (Kim y col 2012). Jing y col (2007) atribuyen la disminución de antocianinas a una posible desnaturalización de proteínas a temperaturas altas, lo cual estaría provocando una degradación de las antocianinas, provocando a una disminución en su contenido. Por lo que estos resultados nos indican la importancia que tienen los métodos de cocción para la retención de nutrientes.

Los tratamientos a los cuales se les aplicó calcio (AscCa y TH-AscCa) tuvieron ligeros aumentos en el CTA, lo cual podría deberse a que la aplicación del calcio

exógeno fortaleció la pared celular, provocando una mayor formación de estructuras de caja de huevo y minimizando la síntesis y lixiviación de compuestos hidrosolubles (Skrovankova y col 2015). Lo cual coincide con los resultados obtenidos por Turmanidze y col (2017), quienes observaron una pérdida de antocianinas de hasta el 30% en frutos de fresas control, comparado con los frutos a los cuales se les aplicó un tratamiento de CaCl_2 con una concentración de 1.0% y 2.0%, donde la reducción en la pérdida de antocianinas fue de 19.0% y 15.5%, respectivamente.

3. Contenido de ácido clorogénico

El ácido clorogénico disminuyó a medida que avanzaron los días de almacenamiento (**Figura 25**), siendo los tratamientos AscCa y TH los que presentaron el mayor contenido en el día inicial mientras que el control y la combinación tuvieron el menor contenido. A partir del día 15 de almacenamiento se observó una disminución significativa para el control y el TH, los cuales a partir de este punto no presentaron diferencia significativa ($p > 0.05$) entre ellos, ni con el resto de los tratamientos en los días 20 y 25. Sin embargo, en el día 15 de almacenamiento se observa que los tratamientos con calcio (AscCa y TH-AscCa) si bien tuvieron una disminución respecto al día 10, no fue tan drástica como los otros dos tratamientos (control y TH).

Las berenjenas son notorias por su capacidad antioxidante, lo cual está directamente relacionado con su contenido de compuestos fenólicos, siendo el ácido clorogénico (ácido 5-O-cafeoil-ácido quínico) el más abundante en la pulpa (Šilarová y col 2019). El contenido de ácido clorogénico en berenjenas está influenciado por factores tanto genéticos como ambientales, incluyendo su estado de desarrollo, cultivar y su manejo poscosecha. Asimismo, las berenjenas son hortalizas bastante

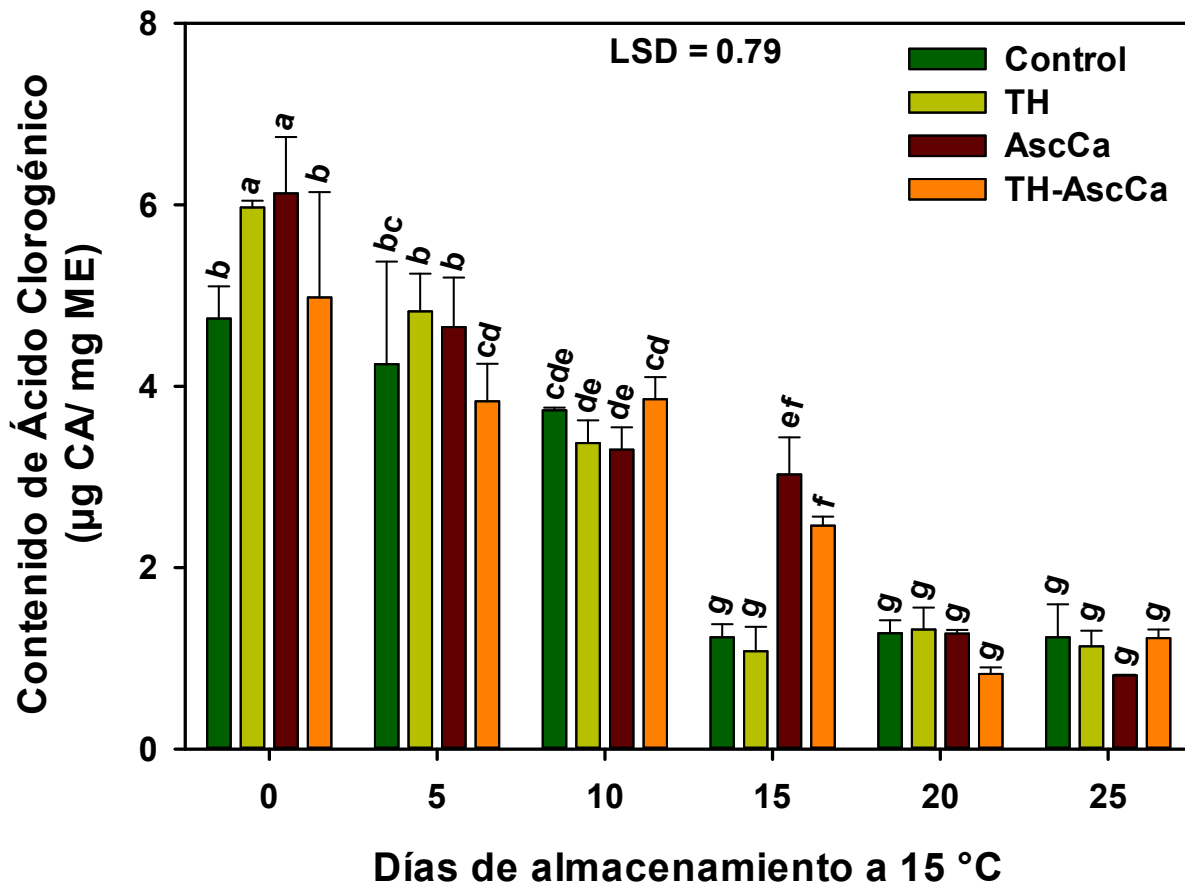


Figura 25. Contenido de ácido clorogénico en frutos de berenjena tratados hidrotérmicamente (TH), con ascorbato de calcio (AscCa) o con la combinación hidrotérmico-ascorbato de calcio (TH-AscCa) y almacenados a 15 °C por un periodo de 25 días. Cada punto representa la media de 6 repeticiones. Las barras verticales indican la DE (n=6). Los valores con diferentes letras indican diferencias significativas entre valores a lo largo del almacenamiento ($\alpha=0.05$).

versátiles, las cuales pueden ser sometidas a diversos procesos y métodos de cocción, lo cual puede afectar tanto su contenido de compuestos fenólicos como su capacidad antioxidante (Concellón y col 2012; Zaro y col 2015).

En este estudio se detectó mayor CAC en los frutos tratados, lo cual podría deberse en el caso de los tratamientos a los cuales se les aplicó el tratamiento térmico (TH y TH-AscCa) a un incremento en la isomerización y en las reacciones de hidrólisis, lo cual conduce a la distribución en la concentración de ácidos fenólicos, debido a la transesterificación que ocurre durante la aplicación de un tratamiento térmico (Šilarová y col 2019; Díaz-Corona y col 2024). Al igual que en este estudio, Zaro y col (2015), observaron un incremento inmediato del CAC respecto al control al aplicar tratamientos de cocción húmedos (vapor, hervido y cocción a presión). Ellos adjudicaron estos resultados en parte a un incremento en la extracción de los compuestos fenólicos unidos a la pared celular al ser sometidos los frutos a estos tratamientos. Estos resultados han sido reportados de igual manera en tomate por Hedrén y col (2002) y berenjena por Ferracane y col (2008).

También son similares a los reportados previamente en berenjenas tratadas térmicamente (asada a 150 °C, horneada 250 °C, a la parrilla a 190 °C por 5 min), donde se observó un aumento de ácido clorogénico en muestras tratadas durante cuatro semanas de almacenamiento (Šilarová y col 2019). Asimismo, Ferracane y col (2008), reportaron que las berenjenas tienen concentraciones muy bajas en productos frescos de ácidos 3, 5- y 4-, 5-di-O-cafeoilquinicos, los cuales se incrementan considerablemente durante la aplicación de tratamientos térmicos. De igual manera Martini y col (2021) mencionan en su estudio que algunos métodos de cocción como

el freír y asado incrementan el CAC, mientras que métodos como hervir y TH tienen un efecto insignificante o ligeramente negativo sobre dicho contenido. Lo cual podría deberse a que los métodos de cocción podrían tener diversos efectos en el ablandamiento y rompimiento de los componentes celulares de diversos frutos (Miglio y col 2008).

Ban y col (2021) detectaron en su estudio una disminución en el contenido de ácido clorogénico a medida que pasaban los días de almacenamiento para todos los tratamientos; sin embargo, en nuestro estudio, al igual que en el de Ban y col (2021), en el día 15 de almacenamiento, observaron que al aplicar CaCl_2 (1.0%, 2.0%, 3.0% y 4.0%) en berenjenas, estos tratamientos retrasaron la pérdida del CAC y otros compuestos fenólicos. Por lo tanto, la aplicación de calcio exógeno en frutos de berenjena, resultó en una disminución en el oscurecimiento de la pulpa de los frutos.

Asimismo, estudios previos han demostrado que la aplicación de concentraciones apropiadas de calcio en los productos hortofrutícolas es benéfica para el desarrollo de los mismos, así como para su adaptación hacia cualquier tipo de estrés al cual sean sometidos, sin embargo, una aplicación excesiva podría interrumpir el funcionamiento normal de su metabolismo (Sun y col 2020; Ban y col 2021).

VIII. CONCLUSIONES

Los modelos matemáticos de predicción obtenidos para las variables de respuesta analizadas en el presente estudio fueron adecuados ya que presentaron valores de p de $F \leq 0.0001$, R^2 ajustada $\geq 0.93\%$, $CV \leq 5.66\%$ y no presentaron falta de ajuste.

Los valores experimentales de actividad de PME, parámetro ΔE , firmeza y contenido de antocianinas obtenidos en condiciones óptimas fueron similares a los valores predichos.

Las condiciones óptimas de tiempo (t) y temperatura (T) encontradas para la aplicación de un tratamiento hidrotérmico fueron $T = 40\text{ }^\circ\text{C}$ y $t = 15\text{ min}$.

Los tratamientos AscCa y TH-AscCa resultaron ser los más efectivos para mantener los parámetros de calidad poscosecha (pérdida de peso, firmeza e índice de oscurecimiento), presentando los mejores valores TH-AscCa durante el almacenamiento de frutos de berenjena a $15\text{ }^\circ\text{C}$.

El tratamiento AscCa y su combinación (TH-AscCa) favorecieron una menor actividad de las enzimas degradadoras de pared celular (PG, PME y β -Gal) en frutos de berenjena almacenada a $15\text{ }^\circ\text{C}$.

La cáscara de los frutos de berenjena tratados con AscCa presentó los niveles más altos de calcio con respecto a la pulpa y el resto de los tratamientos.

Los tratamientos AscCa y TH-AscCa resultaron efectivos para disminuir el daño estructural en berenjena.

La combinación TH-AscCa redujo de manera significativa la actividad de las enzimas PPO y POD.

El tratamiento TH-AscCa retuvo en mayor medida los contenidos de compuestos fenólicos totales y contenido de ácido clorogénico a lo largo del almacenamiento; sin embargo, en el caso del contenido total de antocianinas fue el control el que generó las menores pérdidas en su contenido.

De manera general, la aplicación de un THO a una temperatura de 40 °C por un tiempo de 15 min en combinación con AscCa puede considerarse una estrategia sumamente útil para retrasar la pérdida de calidad de frutos de berenjena prolongando de esta manera su vida de anaquel. Ambos tratamientos son inocuos y ambientalmente seguros, además de que no generan un impacto económico considerable; por lo que no representan riesgos a la salud de los consumidores ni esfuerzos económicos grandes en las líneas de manejo de la berenjena.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Abd-Elhady M. 2014. Effect of citric acid, calcium lactate and low temperature prefreezing treatment on the quality of frozen strawberry. *Annals of Agricultural Science*. 59(1): 69-75.
- Abdel-Aal E. S. M., Huel P. 1999. A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry*. 76(3): 350-354.
- Abreu M., Beirão da Costa S., Concalves E., Beirão da Costa M. L., Moldao-Marins M. 2003. Use of mild heat pre-treatments for quality retention of fresh-cut "Rocha" pear. *Postharvest Biology and Technology*. 30: 135-160.
- Aguayo E., Escalona V. H., Artés F. 2008. Effect of hot water treatment and various calcium salts on quality of fresh-cut 'Amarillo' melon. *Postharvest Biology and Technology*. 47: 397-406.
- Aguiar-Cipriano P., Ekici L., Barnes R. C., Gomes C., Talcott S. T. 2015. Pre-heating and polyphenol oxidase inhibition impact on extraction of purple sweet potato anthocyanins. *Food Chemistry*. 180: 227-234.
- Akbudak B., Akbudak N., Sniz V., Eris A. 2007. Sequential treatments of hot water and modified atmosphere packaging in cherry tomatoes. *Journal of Food Quality*. 30: 869-910.
- Aldon D., Mbengue M., Mazars C., Galaud J. P. 2018. Calcium signaling in plant biotic interactions. *International Journal of Molecular Sciences*. 19(3): 665.

- Alkan O. N., Önder D., Önder S., Karakurt Y. 2022. Cell wall composition and enzyme-related activities in eggplant as affected by hot water, 1-MCP and calcium chloride treatments. *Food Science and Technology International*. 29(6): 665-679.
- Altunkaya A. y Gokmen V. 2008. Effect of various anti-browning agents on phenolic compounds profile of fresh lettuce (*L. Sativa*). *Food Chemistry*. 117: 122-126.
- Amnuaysin N., Jones M. L., Seraypheap K. 2012. Changes in activities and gene expression of enzymes associated with cell wall modification in peels of hot water treated bananas. *Scientia Horticulturae*. 142: 98–104.
- Arkoub-Djermoune L., Boulekbache-Makhlouf L., Zeghichi-Hamri S., Bellili S., Boukhalfa F., Madani K. 2016. Influence of the thermal processing on the physicochemical properties and the antioxidant activity of Solanaceae vegetable: eggplant. *Journal of Food Quality*. 39(3): 1-11.
- Atkinson R. C., Schröder R., Hallett I. C., Cohen D., MacRae E. A. 2002. Overexpression of polygalacturonase in transgenic apple leads to a range of novel phenotypes involving changes in cell adhesion. *Plant Physiology*. 129:122–33.
- Awang Y., Azlan M., Ghani A., Sijam K., Mohamad R. 2011. Effect of calcium chloride on anthracnose disease and postharvest quality of red-flesh dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*). *African Journal of Microbiology Research*. 5: 5250-59.

Ayón-Reyna L., Tamayo-Limón R., Cárdenas-Torres F., López-López M. E., López-Angulo G., López-Moreno H G., López-Cervántes J., López-Valenzuela J A., Vega-García M. O. 2015. Effectiveness of hydrothermal-calcium chloride treatment and chitosan on quality retention and microbial growth during storage of fresh-cut papaya. *Journal of Food Science*. 80(3): 594-601.

Ayón-Reyna L., Delgado-Vargas F., Soltero-Sánchez C. A., López-Angulo G., López-López M. E., López-Velázquez J. G., Parra-Unda J. R., Vega-García M. O. 2018. Bioactive compounds and antioxidant activity of papaya inoculated with *Colletotrichum gloeosporioides* as affected by hot water-calcium chloride. *Journal of Food Biochemistry*. 42(5): e12608.

Báez R., Bringas G., González G., Mendoza T., Ojeda J., Mercado J. 2001. Comportamiento poscosecha del mango "Tommy Atkins" tratado con agua caliente y ceras. *Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticulture*. 44: 39-43.

Ban Q., Liu T., Ning K., Fan J., Cui Q., Guo Y., Zai X. 2021. Effect of calcium treatment on the browning of harvested eggplant fruits and its relation to the metabolisms of reactive oxygen species (ROS) and phenolics. *Food Science and Nutrition*. 9: 5567-5574.

Barbagallo R. N., Chisari M., Caputa G. 2012. Effects of calcium citrate and ascorbate as inhibitors of browning and softening in minimally processed 'Birgah' eggplants. *Postharvest Biology and Technology*. 73: 107-114.

- Basilio- Heredia J., Cisneros-Zevallos L. 2009. The effects of exogenous ethylene and methyl jasmonate on the accumulation of phenolic antioxidants in selected whole and wounded fresh produce. *Food Chemistry*. 115(4): 1500-1508.
- Beirão da Costa S., Steiner A., Correira L., Empis J., Moldão-Martins M. 2006. Effects of maturity stage and mild heat treatments on quality of minimally processed kiwifruit. *Journal of Food Engineering*. 76: 616-625.
- Beirão da Costa S., Cardoso A., Louro-Martins L., Empis J., Moldão-Martins M. 2008. The effect of calcium dips combined with mild heating of whole kiwifruit for fruit slices quality maintenance. *Food Chemistry*. 108: 191-197.
- Braga P. C., Lo Scalzo R., Dal Sasso M., Lattuada N., Greco V., Fibiani M. 2016. Characterization and antioxidant activity of semi-purified extracts and pure delphinidin-glycosides from eggplant peel (*Solanum melongena* L.). *Journal of Functional Foods*. 20: 411-421.
- Brummell D. A. y Harpster M. H. 2001. Cell wall metabolism in fruit ripening and quality and its manipulation in transgenic plants. *Plant Molecular Biology*. 47:311-340.
- Buera M. P., Lozano R. D., Petriella C. 1985. Definition of color in the non-enzymatic browning process. *Die Farbe*. 32(33): 316-326.
- Caffall K. H. y Mohnen D. 2009. The structure, function, and biosynthesis of plant cell wall pecticopolysaccharides. *Carbohydrate Research*. 344(14): 1879-1900.

- Carrillo-López A., Cruz-Hernández A., Cárabez-Trejo A., Guevara-Lara F., Paredes-López O. 2002. Hydrolytic activity and ultrastructural changes in fruit skins from two prickly pear (*Opuntia* sp.) varieties during storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50: 1681-1685.
- Carvajal F., Palma F., Jamilena M., Garrido D. 2015. Preconditioning treatment induces chilling tolerance in zucchini fruit improving different physiological mechanisms against cold injury. *Annals of Applied Biology*. 166: 340-354.
- Chávez-Sánchez I., Carrillo-López A., Vega-García M., Yahia E. M. 2013. The effect of antifungal hot-water treatments on papaya postharvest quality and activity of pectinmethylesterase and polygalacturonase. *Journal Food Science and Technology*. 50: 101-107.
- Cerón A. F., Mejía D. F., Osorio O. 2016. Cinética de inactivación térmica de la enzima pectinmetilesterasa en zumo de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.). *Información Tecnológica*. 27(2): 67-76.
- Chumyam A., Whangchai K., Jungklang J., Faiyue B., Saengnil K. 2013. Effects of heat treatments on antioxidant capacity and total phenolic content of four cultivars of purple skin eggplants. *ScienceAsia*. **39**(3), 246–251.
- Concellón A., Añón M. C., Chaves A. R. 2005. Effect of chilling on ethylene production in eggplant fruit. *Food Chemistry*. 92(1): 63-69.
- Concellón A., Zaro M. J., Chaves A. R., Vicente A. R. 2012. Changes in quality and phenolic antioxidants in dark purple American eggplant (*Solanum melongena* L.

cv. Lucía) as affected by storage at 0 °C and 10 °C. *Postharvest Biology and Technology*. 66: 35e41.

Condurache N. N., Croitoru C., Enachi E., Bahrim G. E., Stănciuc N., Râpeanu G. 2021. Eggplant peels as a valuable source of anthocyanins: Extraction, thermal stability and biological activities. *Plants*. 10(3): 577.

Conway W. S., Sam C. E. 1987. The effects of postharvest infiltration of calcium, magnesium, or strontium on decay, firmness, respiration, and ethylene production in apples. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 112(3): 300-303.

D'arcy W. G. 1975. The *Solanaceae*: an overview. *Solanaceae Newsletter*., 2: 8-15.

Daunay M. C., Lester R. N., Ano G. 1997. Les aubergines. En: *L'amélioration des plantes tropicales*. eds. Cirad et Ortstom, Montpellier, Francia. Pp. 83-107.

Díaz-Corona D. A., López-López M. E., Ayón-Reyna L. E., López-Velázquez J. G., López-Zazueta B. A., Vega-García M. O. 2020. Impact of hot water-calcium on the activity of cell wall degrading and antioxidant system enzymes in mango stored at chilling temperature. *Journal of Food Biochemistry*. 44, e13286.

Díaz-Corona D. A., López-López M. E., Ayón-Reyna L. E., Caro-Corrales J., Gutiérrez-Dorado R., Bastidas-Bastidas P. J., Vega-García M. O. 2024. Characterization of an optimized hot water treatment for eggplant as a non-chemical mean to maintain postharvest quality: validation of its effect on bioactive compounds and

antioxidant capacity. Journal of Food Measurement and Characterization. 10.1007/s11694-024-02401-4.

Diwakar S. K. 2015. Purification and characterization of ionically unbound polyphenol oxidase from *Cinnamomum tamala* syn. Cinnamomun leaves. Applied Food Biotechnology. 2(2): 33-41.

Elbagoury M. M., Turoop L., Runo S., Sila D. N. 2021. Regulatory influences of methyl jasmonate and calcium chloride on chilling injury of banana fruit during cold storage and ripening. Food Sciences and Nutrition. 9(2): 929-942.

El-Samahy S. K., Bothaina M., Youssef A. A., Askar H. M., Swailam M. 2000. Microbiological and chemical properties of irradiated mango. Journal of Food Safety. 20(3): 139-156.

FAOSTAT. 2022. Datos sobre alimentación y agricultura. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#home> Consultado en Mayo de 2023.

Fallik E. 2004. Prestorage hot water treatments (immersion, rinsing and brushing). Postharvest Biology and Technology. 32: 125-134.

Fan X., Anoa B., Beaulieu J., Sites J. 2008. Effect of hot water Surface pasteurization of whole fruit on shelf life and quality of fresh-cut cantaloupes. Journal of Food Science. 73: 91-98.

FAO. 1987. Operaciones de cosecha y campo. Disponible en www.fao.org. Consultado en Abril de 2017.

- Ferarsa S., Zhang W., Moulai-Mostefa N., Ding L., Jaffrin M. Y., Grimi N. 2018. Recovery of anthocyanins and other phenolic compounds from purple eggplant peels and pulp using ultrasonic-assisted extraction. *Food and Bioprocess Processing*. 109: 19-28.
- Ferracane R., Pellegrini N., Visconti A., Graziani G., Chiavaro E., Miglio C., Fogliano V. 2008. Effects of different cooking methods on antioxidant profile, antioxidant capacity, and physical characteristics of artichoke. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56(18): 8601–8608.
- Figuerola J., Salcedo J., Aguas Y., Olivero R., Narvaez G. 2011. Recubrimientos comestibles en la conservación del mango y aguacate, y perspectiva, al uso del propóleo en su formulación. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*. 3(2): 386-400.
- Fraeye I., Doungra E., Duvetter T., Moldenaers P., Van Loey A., Hendrickx M. 2009. Influence of intrinsic and extrinsic factors on rheology of pectin-calcium gels. *Food Hydrocolloids*. 23(8): 2069-2077.
- Gancarz I., Bryjak J., Zynek K. 2009. Chemical modification of poly ethylene terephthalate) and immobilization of the selected enzymes on the modified film. *Applied Surface Science*. 255: 8293-8298.
- García J. M., Aguilera C., Jiménez A. M. 1996. Gray mold in and quality of strawberry fruit following postharvest heat treatment. *Horticultural Science*. 31(2):255-57.

- García-Martínez R., López-Jiménez A., Saucedo-Veloz C., Salazar-García S., Suárez-Espinosa J. 2015. Maduración y calidad de frutos de mango “Kent” con tres niveles de fertilización. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(4): 665-678.
- García-Serrano P., Romero C., García-García P., Brenes M. 2020. Influence of the type of calcium salt on the cation absorption and firmness of black ripe olives. *International Journal of Food Science and Technology*. 56: 919–926.
- Ghasemnezhad M., Marshal K., Shilton R., Babalar M., Woolf A. 2008. Effect of hot water treatments on chilling injury and heat damage in “Satsuma” mandarins: Antioxidant enzymes and vacuolar ATPase, and pyrophosphatase. *Postharvest Biology and Technology*. 48: 364-371.
- Gobierno de México. DATA MÉXICO. 2024. Berenjenas, Frescas o Refrigeradas. Disponible en <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/eggplants-fresh-or-chilled>. Consultado en abril de 2024.
- Gómez F., Fernández L., Gustavo G., Guiamett J. J., Chaves A., Bartoli C. G. 2008. Heat shock increases mitochondrial H₂O₂ production and extends postharvest life of spinach leaves. *Postharvest Biology and Technology*. 49: 229-234.
- González M. N., Massa G. A., Andersson M., Turesson H., Olsson N., Fält A. S., Storani L., Décima-Oneto C. A., Hofvander P., Feingold S. E. 2019. Reduced enzymatic browning in potato tubers by specific editing of a polyphenol oxidase gene via

ribonucleoprotein complexes delivery of the CRISPR/Cas9 system. *Frontiers in Plant Science*. 10: 1649.

González-Aguilar G. A., Gayosso L., Cruz R., Fortiz J., Báez R., Wang C. Y. 2000. Polyamines induced by hot water treatments reduce chilling injury and decay in pepper fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 18: 19-26.

González-Lavaut J. A., Montes de Oca-Rojas Y., Domínguez-Mesa M. I. 2007. Breve reseña de la especie *Solanum melongena* L. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*. 12(3): 1028-4796.

Hadfield K. A., Rose J. K. C., Yaver D. S., Berka R. M., Bennett A. B. 1998. Polygalacturonase gene expression in ripe melon fruit supports a role for polygalacturonase in ripening-associated pectin disassembly. *Plant Physiology*. 117:363–73.

Hagerman A. E., Austin P. J. 1986. Continuous spectrophotometric assay for plant pectin methyl esterase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 34(3): 440-444.

Haider M. W., Nafees M., Iqbal R., Ali S., Asad H., Azeem F., Arslan M., Rahman M. H., Gaafar A. R. Z., Elshikh M. S. 2023. Combined application of hot water treatment and aucalyptus leaf extract postpones senescence in harvested green chillies by conserving their antioxidants: a sustainable approach. *BMC Plant Biology*. 23:576.

- Harakotr B., Suriharn B., Tangwongchai R., Scott M. P., Lertrat K. 2014. Anthocynin, phenolics and antioxidant activity changes in purple waxy corn as affected by traditional cooking. *Food Chemistry*. 164:510-517.
- Hedrén E., Díaz V., Svanberg U. 2002. Estimation of carotenoid accessibility from carrots determined by an in vitro digestion method. *European Journal of Clinical Nutrition*. 56(5): 425-430.
- Hemmaty S., Moallemi N., Naseri L. 2007. Effect of UV-C radiation and hot water on the calcium content and postharvest quality of apples. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 5: 59-68.
- Hewajulige I. G. N., Wilson-Wijeratnam R.S., Wijesundera R. L. C., Abeysekere M. 2003. Fruit calcium concentration and chilling injury during low temperature storage of pineapple. *Journal of the Science of Food Agriculture*. 83: 1451-1454.
- Hossain A., Rana M., Kimura Y., Roslan H. A. 2014. Changes in biochemical characteristics and activities of ripening associated enzymes in mango fruit during the storage at different temperatures. *BioMed Research International*. 11 pages.
- Hossain A., Rana M., Uddin S., Kimura Y. 2020. Changes in organoleptic and biochemical characteristics of mango fruits treated with calcium chloride in hot water. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*. 4(1): 37-50.
- Iribarren M. J., Vallejo F., Weingandt V. C., Litardo M. C., Torelli C., Vergara M. V., González B. A. 2011. Relevamineto de enfermedades en tallos y frutos de

berenjena en el NE de la provincia de Buenos Aires durante la etapa reproductiva. Libro de resúmenes 2° Congreso Argentino de Fitopatología. Mar del Plata. 118.

Jiang J. F., Li J. G., Dong Y. H. 2013. Effect of calcium nutrition on resistance of tomato against bacterial wilt induced by *Ralstonia solanacearum*. European Journal of Plant Pathology. 136: 547-555.

Jing P., Noriega V., Schwartz S. J., Giusti M. M. 2007. Effects of growing conditions on purple corncob (*Zea mays* L.) anthocyanins. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 55: 8625-8629.

Kashyap V., Kumar S. V., Collonnier C., Fusari F., Haicour R., Rotino G. L., Sihachakr D., Rajam M. V. 2003. Biotechnology of eggplant. Scientia Horticulturae. 97:1-25.

Kaur C., Nagal S., Nishad J., Kumar R., Sarika. 2014. Evaluating eggplant (*Solanum melongena* L.) genotypes for bioactive properties: a chemometric approach. Food Research International. 60: 205-211.

Kaushik N., Rao P. S., Mishra H. N. 2017. Effect of high pressure and thermal processing on spoilage-causing enzymes in mango (*Mangifera indica*). Food Research International. 100: 885-893.

Ke D. y Saltveit M. E. 1986. Effects of calcium and auxin on russet spotting and phenylalanine ammonialyase activity in iceberg lettuce. American Society for Horticultural Science. 21(5): 1169-1171.

- Ketsa S., Chidtragool S., Klein J. D., Lurie S. 1998. Ethylene synthesis in mango fruit following heat treatment. *Postharvest Biology and Technology*. 15: 65-72.
- Khaliq G., Mohamed M. T. M., Ali A., Ding P., Ghazali H. M. 2015. Effect of gum arabic coating combined with calcium chloride on physico-chemical and qualitative properties of mango (*Mangifera indica* L.) fruit during low temperature storage. *Scientia Horticulturae*. 190: 187-194.
- Khan R. 1979. *Solanum melongena* and its ancestral form. En: Hawkes J. G., Lester R. N., Skelding A. D., (eds.). *The biology and taxonomy of the Solanaceae*. The Linnean Society of London, London. Pp. 629-626.
- Kim H. W., Kim J. B., Cho S. M., Chung M. N., Lee Y. M., Chu S. M., Che J. H., Kim S. N., Kim S. Y., Cho Y. S. 2012. Anthocyanin changes in the Korean purple-fleshed sweet potato, Shinzami, as affected by steaming and baking. *Food Chemistry*. 130: 966-972.
- Kou X., Wu M., Li L., Wang S., Xue Z., Liu B., Fei Y. 2015. Effects of CaCl₂ dipping and pullulan coating on the development of brown spot on 'Huangguan' pears during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*. 99: 63–72.
- Kudla J., Batistic O., Hashimoto K. 2010. Calcium signals: The lead currency of plant information processing. *The Plant Cell*. 22(3): 541–563.
- Laminkara O. y Watson M. A. 2007. Mild heat and calcium treatment effects on fresh-cut cantaloupe melon during storage. *Food Chemistry*. 102:1383-1388.

- Lazan H., Selamat M. K., Ali Z. M. 1995. B-Galactosidase, polygalacturonase and pectinesterase in differential softening and cell wall modification during papaya fruit ripening. *Physiologia Plantarum*. 95: 106:112.
- Lemos M. L., Gutiérrez D. R., Farias M. J., Rodríguez S. C. 2023. Application of antioxidants and hot water treatments to improve shelf life of fresh-cut eggplants (*Solanum melongena* L.) during storage. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. 76(2): 10381-10392.
- Li J., Zhou Q., Zhou X., Wei B., Zhao Y., Ji S. 2020. Calcium treatment alleviates pericarp browning of “Nanguo” pears by regulating the GABA shunt after cold storage. *Frontiers in Plant Science*. 11: 580986.
- Liu L., Wei Y., Shi F., Liu C., Liu X., Ji S. 2015. Intermittent warming improves postharvest quality of bell peppers and reduces chilling injury. *Postharvest Biology and Technology*. 101. 18-25.
- Liu X., Yang Q., Lu Y., Li Y., Li T., Zhou B., Qiao L. 2019. Effect of purslane (*Portulaca oleracea* L.) extract on anti-browning of fresh-cut potato slices during storage. *Food Chemistry*. 283: 445-453.
- Liu X., Zhang A., Shang J., Zhu Z., Li Y., Wu X., Zha D. 2021. Study on browning mechanism of fresh-cut eggplant (*Solanum melongena* L.) based on metabolomics, enzymatic assays and gene expression. *Scientific Reports*. 11: 6937.

- López-López M., Vega-Espinoza A., Ayón-Reyna L., López-Valenzuela J., Vega-García M. 2013. Combined effect of hot water dipping treatment, N-acetylcysteine and calcium on quality retention and enzymatic activity of fresh-cut apple. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 11(2): 243-248.
- López-Velázquez J. G., Delgado-Vargas F., López-Ángulo G., García-Armenta E., López-López M. E., Ayón-Reyna L. E., Díaz-Corona D. A., Vega-García M. O. 2020. Phenolic profile associated with chilling tolerance induced by the application of a hot water treatment in bell pepper fruit. *Journal of Food Science*. 85(7): 10.1111/1750-3841.15310.
- López-Velázquez J. G., López-López M. E., Rubio-Trías A., Ayón-Reyna L. E., Díaz-Corona D. A., Olivas-Orozco G. I., Molina-Corral J., Vega-García M. O. 2022. Cell wall stabilization and calcium absorption on mango fruit treated with a quarantine hot water treatment combined with calcium salts and stored at chilling temperature. *Food Biochemistry*. 00:e14266.
- Loypimai P., Moongngarm A., Chottanom P. 2016. Thermal and pH degradation kinetics of anthocyanins in natural food colorant prepared from black rice bran. *Journal of Food Science and Technology*. 53(1): 461-470.
- Luan A., Zhang W., Yang M., Zhong Z., Wu J., He Y., He J. 2023. Unveiling the molecular mechanism involving anthocyanins in pineapple peel discoloration during fruit maturation. *Food Chemistry*. 412: 135482.
- Luengwilai K., Saltveit M., Beckles D. M. 2012. Metabolite content of harvested microtom tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit is altered by chilling and

protective heat-shock treatments as shown by GC-MS metabolic profiling. *Postharvest Biology and Technology*. 63: 116-122.

Lurie S. 1998. Postharvest heat treatment. *Postharvest Biology and Technology*. 14: 257-269.

Luthria D. L. 2012, A simplified UV spectral scan method for the estimation of phenolic acids and antioxidant capacity in eggplant pulp extracts. *Journal of Functional Food*. 4: 238-242.

Ma X., Wu H., Liu L., Yao Q., Wang S., Zhan R., Xing S., Zhou Y. 2011. Polyphenolic compounds and antioxidant properties in mango fruits. *Scientia Horticulturae*. 129: 102-197.

Ma Q., Sou J., Huber D. J., Dong X., Han Y., Zhang Z., Rao J. 2014. Effect of hot water treatments on chilling injury and expression of a new C-repeat binding factor (CBF) in “Hongyang” kiwifruit during low temperature storage. *Postharvest Biology and Technology*. 97: 102-110.

Madani B., Mohameda M. T. M., Biggs A. R., Kadir J., Awang Y., Tayebimeigooni A., Shojaei T. R. 2014. Effect of pre-harvest calcium chloride applications on fruit calcium level and post-harvest anthracnose disease of papaya. *Crop Protection*. 55: 55-60.

Madani B., Mirshekari A., Yahia E. 2016. Effect of calcium chloride treatments on calcium content, anthracnose severity and antioxidant activity in papaya fruit

during ambient storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 96(9): 2963-8.

Mahmud T. M. M., Al Eryani-Raqeeb A., Syed Omar S. R., Mohamed Zaki A. R., Al Eryani A. R. 2008. Effects of different concentrations and applications of calcium on storage life and physicochemical characteristics of papaya (*Carica Papaya* L.). *American Journal of Agriculture and Biological Sciences*. 3(3): 526-533.

Malegori C., Franzetti L., Guidetti R., Casiraghi E., Rossi R. 2016. GLCM, an image analysis technique for early detection of biofilm. *Journal of Food Engineering*. 185: 48-55.

Manganaris G., Vasilakakis M., Diamantidis G., Mignani I. 2013. The effect of postharvest calcium application on tissue calcium concentration, quality attributes, incidence of flesh browning and cell wall physicochemical aspects of peach fruits. *Food Chemistry*. 100(4): 1385-1392.

Mariano-Nasser F., Vanz-Borges C., Arruda-Ramos J., Dominguez-Nasser M., Alencar-Lundgren G., Aparecida-Furlaneto K., Regina-Kovalski T., Lopes-Vieites R. 2019. Bioactive compounds and enzymatic activity in minimally processed eggplant packed under active modified atmosphere. *Semina: Ciencias Agrarias*. 40(1), 139-148.

Martin-Diana A. B., Rico D., Barry-Ryan C., Frias J. M., Mulcahy J., Henehan G. T. M. 2005. Effect of calcium lactate concentration and temperature washing treatments on quality retention of salad-cut iceberg lettuce. *Food Research International*. 38: 729-740.

- Martin L. B. B. y Rose J. K. C. 2014. There's more than one way to skin a fruit: formation and functions of fruit cuticles. *Journal of Experimental Botany*. 65(16): 4639-51.
- Martini S., Conte A., Cattivelli A., Tagliazucchi D. 2021. Domestic cooking methods affect the stability and bioaccessibility of dark purple eggplant (*Solanum melongena*) phenolic compounds. *Food Chemistry*. 341: 128298.
- Mattioli R., Francioso A., Mosca L., Silva P. 2020. Anthocyanins: A comprehensive review of their chemical properties and health effects on cardiovascular and neurodegenerative diseases. *Molecules*. 25(17): 3809.
- Mennella G., Lo Scalzo R., Fibiani M., D'Alessandro A., Francese G., Toppino L. 2012. Chemical and bioactive quality traits during fruit ripening in eggplant (*S. melongena* L.) and allied species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 60(47): 11821-11831.
- Mercer M. D. & Smittle D. A. 1992. Storage atmospheres influence chilling injury and chilling injury-induced changes in cell wall polysaccharides of cucumber. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 117: 930-933.
- Miceli A., Ippolito A., Linsalata V., Nigro F. 1999. Effect of preharvest calcium treatment on decay and biochemical changes of table grape during storage. *Phytopathologia Mediterranea*. 38: 47-53.
- Mirdehghan S. H., Rahemi M., Martínez-Romero D., Guillén F., Valverde J. M., Zapata P. J., Serrano M., Valero D. 2007. Reduction of pomegranate chilling injury

during storage after heat treatment: Role of polyamines. *Postharvest Biology and Technology*. 44: 19-25.

Mirshekari A. & Madani B. 2021. Effects of hot water and calcium lactate treatments on fresh-cut quality of papaya. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*. 4: 81-90.

Mishra B. B. y Gautam S. 2016. Polyphenol oxidases: Biochemical and molecular characterization, distribution, role and its control. *Enzyme Engineering*. 5(1).

Mishra B. B., Gautam S., Sharma A. 2012. Browning of fresh-cut eggplant: impact of cutting and storage. *Postharvest Biology and Technology*. 67: 44-51.

Moon K. M., Kwon E. B., Lee B., Kim C. Y. 2020. Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products. *Molecules*. 25(12): 2754.

Morales-Delgado D. Y., Téllez-Medina D. I., Rivero-Ramírez N. L., Arellano-Cárdenas S., López-Cortez S., Hernández-Sánchez H., Gutiérrez-López G., Cornejo-Mazón M. 2014. Effect of convective drying on total anthocyanin content, antioxidant activity and cell morphometric parameters of strawberry parenchymal tissue (*Fragaria x ananassa* Dutch). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 13: 179-187.

Moreiras O., Carbajal A., Cabrera L., Cuadrado C. 2013. *Tablas de composición de alimentos*. Editorial Pirámide, 16° ed. 42-43.

- Muy-Rangel D., Siller-Cepeda J., García-Estrada R., Báez-Sañudo M. 2002. Caracterización poscosecha de berenjenas producidas en Sinaloa, México. Revista Chapingo Serie Horticultura. 8(2): 171-181.
- Naeem M. Y. y Ugur S. 2020. Nutritional Content and Health Benefits of Eggplant. Turkish Journal of Agriculture- Food Science and Technology. 7(3): 31-36.
- Nasef I. N. 2018. Short hot water as safe treatment induces chilling tolerance and antioxidant enzymes, prevents decay and maintains quality of cold-stored cucumbers. Postharvest Biology and Technology. 138: 1-10.
- Ngamchuachit P., Sivertsen H. K., Mitcham E. J., Barrett D. M. 2014. Effectiveness of calcium chloride and calcium lactate on maintenance of textural and sensory qualities of fresh-cut mangos. Journal of Food Science. 79(5): 786-794.
- Niño-Medina G., Urías-Orona V., Muy-Rangel M. D., Heredia J. B. 2017. Structure and content of phenolics in eggplant (*Solanum melongena*) – a review. South African Journal of Botany. 111: 161-169.
- Ohyama A., Yamaguchi H., Miyatake K., Negoro S., Numome T., Saito T., Fukuoka H. 2022. Genetic mapping of simply inherited categorical traits, including anthocyanin accumulation profiles and fruit appearance, in eggplant (*Solanum melongena*). Molecular Biology Report. 49: 9147-9157.
- Önder D. G., Önder S., Uysal A. T., Karakurt Y. 2021. Impact of postharvest hot water, 1-MCP and CaCl₂ treatments on antioxidant enzymes and related genes during

- cold storage in sweet cherry (*Prunus avium* L.). *Journal of Food Measurement and Characterization*. 15: 5744-5758.
- Pérez-Almeida I. y Carpita N. 2006. Las β -galactosidasas y la dinámica de la pared celular. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*. 31(7): 476-483.
- Porat R., Pavoncello D., Peretz J., Ben-Yehoshua S., Lurie S. 2000. Effects of various heat treatments on the induction of cold tolerance and on the postharvest qualities of "Star Ruby" grape fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 18: 159-165.
- Rahman M. M., Rahman M. M., Absar N., Ahsan M. A. 2011. Correlation of carbohydrate content with the changes in amylase, invertase and galactosidase activity of ripe mango pulp during storage under different temperatures. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*. 46(4): 443-446.
- Ranty B., Aldon D., Cotellet V., Galaud J. P., Thuleau P., Mazars C. 2016. Calcium sensors as key hubs in plant responses to biotic and abiotic stresses. *Frontiers in Plant Science*. 7: 327.
- Rincón-Pérez A. y Martínez-Quintero E. 2015. Funciones del calcio en la calidad poscosecha de frutas y hortalizas: una revisión. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 24(34): 13-25.
- Rotino G. L., Sala T., Toppino L. 2014. Eggplant. In: Pratap, A., Kumar J. (eds) *Alien gene transfer in crop plants, Volume 2*. Springer, New York, NY.

- Rugkong A., Rose J. K. C., Lee S. J., Giovannoni J. J., O'Neill M. A., Watkins C. B. 2010. Cell wall metabolism in cold-stored tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 57: 106-113.
- Rui H., Cao S., Shang H., Jin P., Wang K., Zheng Y. 2010. Effects of heat treatment on internal browning and membrane fatty acid in loquat fruit in response to chilling stress. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 90: 1557-1561.
- Russo P., Adiletta G., Di Matteo M. 2012. The influence of drying air temperature on the physical properties of dried and rehydrated eggplant. *Food and Bioproducts Processing*. 91(C3): 1-8.
- Sajid A., Khan A. S., Anjum M. A., Nawaz A., Naz S., Ejaz S., Hussain S. 2020. Effect of postharvest oxalic acid application on enzymatic browning and quality of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) root slices. *Food Chemistry*. 312: 126051.
- Salazar-Salas N. Y., Valenzuela-Ponce L., Vega-García M. O., Pineda-Hidalgo K. P., Vega-Álvarez M., Chavez-Ontiveros J., Delgado-Vargas F., López-Valenzuela J. A. 2017. Protein changes associated with chilling tolerance in tomato fruit with hot water pretreatment. *Postharvest Biology and Technology*. 134: 22-30.
- Sánchez-Bel P., Egea I., Sánchez-Ballesta M. T., Martínez-Madrid C., Fernández-García N., Romojaro F., Olmos E., Estrella E., Bolarín M., Borja-Flores F. 2012. Understanding the mechanisms of chilling injury in bell pepper fruits using the proteomic approach. *Journal of proteomics*. 75: 5463–5478.

- Sharma R. R. y Singh R. 2009. The fruit pitting disorder-Aphysiological anomaly in mango (*Mangifera indica* L.) due to deficiency of calcium and boron. *Scientia Horticulturae*. 119(4): 88-91.
- Sharma R. R., Singh R., Pal R. K. 2013. Synergistic influence of pre-harvest calcium sprays and postharvest hot water treatment on fruit firmness, decay, bitter pit incidence and postharvest quality of royal delicious apples (*Malus x domestica* Borkh). *American Journal of Plant Sciences*. 4: 153-159.
- SIAP. SAGARPA. 2022. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en www.siap.gob.mx . Consultado en enero de 2024.
- SIAP. SAGARPA. 2022. Atlas Agroalimentario. Disponible en https://nube.siap.gob.mx/gomx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018 Consultado en enero de 2024.
- Šilarová P., Boulekbache-Makhlouf L., Pellati F., Česlová L. 2019. Monitoring of chlorogenic acid and antioxidant capacity of *Solanum melongena* L. (Eggplant) under different heat and storage treatments. *Antioxidants*. **8**:234.
- Silva J.M., Villar H.P., Pimentel R.M.M. 2012. Structure of the cell wall of mango after application of ionizing radiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 81: 1770-1775.
- Silva-Martins E., Ribeiro Leite R. S., da Silva R., Gomes E. 2013. Purification and properties of polygalacturonase produced by thermophilic fungus *thermoascus*

aurantiacus CBMAI-756 on solid-state fermentation. *Enzyme Research*.
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/438645>.

Silveira A. C., Aguayo E., Escalona V. H., Artés F. 2011. Hot water treatment and peracetic acid to maintain fresh-cut Galia melon quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 12: 569-576.

Simpson M. G. 2010. Diversity and classification of flowering plants: Eudicots. *Plant Systematics* (2° Ed). Pp: 275-448. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374380-0.50008-7>.

Sinela A. M., Mertz C., Achir N., Rawat N., Vidot K., Fulcrand H., Dornier M. 2017. Exploration of reaction mechanisms of anthocyanin degradation in a roselle extract through kinetic studies on formulated model media. *Food Chemistry*. 235: 67-75.

Skrovankova S., Sumczynski D., Mlcek J., Jurikova T., Sochor J. 2015. Bioactive compounds and antioxidant activity in different types of berries. *International Journal of Molecular Sciences*. 16: 24673-24706.

Spadoni A., Guidarelli M., Sanzani S. M., Ippolito A., Mari M. 2014. Influence of hot water treatment on brown rot of peach and rapid fruit response to heat stress. *Postharvest Biology and Technology*. 94: 66-73.

Steinhorst L. y Kudla J. 2014. Signaling in cells and organisms-calcium holds the line. *Current Opinion in Plant Biology*. 22: 14–21.

- Stommel J. R., Whitaker B. D., Haynes K. G., Prohens J. 2015. Genotype x environment interactions in eggplant for fruit phenolic acid content. *Euphytica*. 205: 823-836.
- Suzuki Y., Asoda T., Matsumoto Y., Terai H., Kato M. 2005. Suppression of the expression of genes encoding ethylene biosynthetic enzymes in harvested broccoli with high temperature treatment. *Postharvest Biology and Technology*. 36: 265-271.
- Taher D., Solberg S. O., Prohens J., Chou Y., Rakha M., Wu T. 2017. World vegetable center eggplant collection: origin, composition, seed dissemination and utilization in breeding. *Frontiers in Plant Science*. 8: 1484.
- Tang T., Xie X., Ren X., Wang W., Tang X., Zhang J., Wang Z. 2020. A difference of enzymatic browning unrelated to PPO from physiology, targeted metabolomics and gene expression analysis in Fuji apples. *Postharvest Biology and Technology*. 170: 111323.
- Tao D. B., Wang J. W., Zhang L., Jiang Y. G., Lv M. 1-Methylcyclopropene alleviates peel browning of “Nanguo” pears by regulating energy, antioxidant and lipid metabolisms after long term refrigeration. *Scientia Horticulturae*. 247: 254-263.
- Tapia M. R., Gutierrez-Pacheco M. M., Vazquez-Armenta F. J., Gonzalez-Aguilar G. A., Ayala-Zavala J. F., Rahman M. S. H., Siddiqui M. W. 2015. Washing, peeling and cutting of fresh-cut fruits and vegetables. In: Siddiqui M. W., Rahman M. S. (eds). *Minimally processed foods*. Springer, Switzerland. Pp: 57-58.

- Taranto F., Pasqualone A., Mangini G., Tripodi P., Miazzi M. M., Pavan S., Montemurro C. 2017. Polyphenol oxidases in crops: Biochemical, physiological and genetic aspects. *International Journal of Molecular Science*. 18: 377-393.
- Todaro A., Cimino F., Rapisarda P., Catalano A. E., Barbagallo R. N., Spagna G. 2009. Recovery of anthocyanins from eggplant peel. *Food Chemistry*. 114: 434-439.
- Tsouvaltzis P., Deltsidis A., Brecht J. K. 2011. Hot water treatment and pre-processing storage reduce browning development in fresh-cut potato slices. *Research Article*. 46(9): 1282-1286.
- Turmanidze T., Gulua L., Jgenti M., Wicker L. 2017. Potential antioxidant retention and quality maintenance in raspberries and strawberries treated with calcium chloride and stored under refrigeration. *Brazilian Journal of Food Technology*. 20: e2016089.
- Uchida K., Tomita H., Takemori T., Takamura H. 2017. Effects of grilling on total polyphenol content and antioxidant capacity of eggplant (*Solanum melongena* L.). *Journal of Food Science*. 82(1): 202-207.
- USDA. USDA report 11209. 2018. Eggplant, raw. Disponible en <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169228/nutrients> Consultado en Febrero de 2024.
- Varella P., Salvador A., Fiszman S.M. 2007. The use of calcium chloride in minimally processed apples. *European Food Research and Technology*. 224(4): 461-467.

- Vicente A. R., Costa M. L., Martínez G. A., Chaves A. R., Civello P. M. 2005. Effect of heat treatments on cell wall degradation and softening in strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 38(3): 213-222.
- Vivar-Vera M. A., Salazar J. A., Calva G., Ramos E. G. 2007. Extraction, thermal stability and kinetic behavior of pectinmethylesterase from hawthorn (*Crataegus pubescens*) fruit. *LWT- Food Science and Technology*. 40: 278-284.
- Voragen A. G. J., Coenen G. J., Verhoef R. P., Schols H. A. 2009. Pectin, a versatile polysaccharide presents in plant cell walls. *Structural Chemistry*. 20: 263-275.
- Wang Y., Xie X., Long L. E. 2014. The effect of postharvest calcium application in hydro-cooling water on tissue calcium content, biochemical changes, and quality attributes of sweet cherry fruit. *Food Chemistry*. 160, 22–30.
- Wei D. y Zhao X. H. 2020. Calcium maintained higher quality and enhanced resistance against chilling stress by regulating enzymes in reactive oxygen and biofilm metabolism of Chinese Winter jujube fruit. *Journal of Food Biochemistry*. 44: e13161.
- Wormit A. y Usadel B. 2018. The multifaceted role of pectin methylesterase inhibitors (PMEIs). *International Journal of Molecular Sciences*. 19(10): 2878-2897.
- Wu X., Gu L., Prior R. L., McKay S. 2004. Characterization of anthocyanins and proanthocyanidins in some cultivars of ribes, aronia, and sambucus and their antioxidant capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 52: 7846-7856.

- Xiong T., Tan Q., Li S., Mazars C., Galaud J. P., Zhu X. 2021. Interactions between calcium and ABA signaling pathways in the regulation of fruit ripening. *Journal of Plant Physiology*. 256: 153309.
- Yang S. J., Hosokawa M., Mizuta Y., Yun J. G., Mano J., Yazawa S. 2001. Antioxidant capacity is correlated with susceptibility to leaf spot caused by rapid temperature drop in *Saintpaulia* (African violet). *Scientia Horticulturae*. 88: 59-69.
- Yang J., Fu M. R., Zhao Y. Y., Mao L. C. 2009. Reduction of chilling injury and ultrastructural damage in cherry tomato fruits after hot water treatment. *Agricultural Science China*. 8(3): 304-310.
- Yildiz G. y Aadil R. M. 2021. Comparative analysis of antibrowning agents, hot water and high-intensity ultrasound treatments to maintain the quality of fresh-cut mangoes. *Journal of Food Science and Technology*. 59: 202-211.
- Yildiz D., Gürel D. B., Çağindi Ö., Kayaardi S. 2022. Heat treatment and microwave applications on homemade sour cherry juice: The effect on anthocyanin content and some physicochemical properties. *Current Plant Biology*. 29: 100242.
- Yimyong S., Datsenka T. U., Handa A. K., Seaypheap K. 2011. Hot water treatment delays ripening-associated metabolic shift in “Okrong” mango fruit during storage. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 136: 441-451.

- Yingsanga P. 2008. Relationship between structure and browning in rambutan fruit (*Nephelium lappaceum* L.) Ph.D. Thesis in Postharvest Technology. King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 128p.
- Yoruk R. y Marshall M. R. 2003. Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: A review. *Journal of Food Biochemistry*. 27: 361-422.
- Zaro M. J., Keunchkarian S., Chaves A. R., Vicente A. R., Concellón A. 2014. Changes in bioactive compounds and response to postharvest storage conditions in purple eggplants as affected by fruit developmental storage. *Postharvest Biology and Technology*. 96: 110-117.
- Zaro M. J., Ortiz L. C., Keunchkarian S., Chaves A. R., Vicente A. R., Concellón A. 2015. Chlorogenic acid retention in white and purple eggplant after processing and cooking. *LWT- Food Science and Technology*. 64: 802-808.
- Zhang Z., Gao Z., Li M., Hu M., Gao H., Yang D., Yang B. 2012. Hot water treatment maintains normal ripening and cell Wall metabolism in mango (*Mangifera indica* L.) fruit. *HortScience*. 47(10): 1466-1471.
- Zhang N., Yang Z., Chen A., Zhao S. 2014. Effects of intermittent heat treatment on sensory quality and antioxidant enzymes of cucumber. *Scientia Horticulturae*. 170: 39- 44.
- Zhang Y., Deng Z., Li H., Zheng L., Liu R., Zhang B. 2020. Degradation kinetics of anthocyanins from purple eggplant in fortified food model system during

microwave and frying treatments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
68(42): 11817-11828.

Zhang W., Guo M., Yang W., Liu Y., Wang Y., Chen G. 2022. The role of cell wall polysaccharides disassembly and enzyme activity changes in the softening process of Hami melon (*Cucumis melo* L.). *Foods*. 11: 841.

ABREVIATURAS

α	Alfa
β	Beta
Δ	Delta
ρ	Para
μL	Microlitro (s)
μg	Microgramo (s)
μm	Micrómetro
μmol	Micromol (es)
%	Porcentaje
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
1-MPC	1-metilciclopropeno
AscCa	Ascorbato de Calcio
bs	Base seca
Ca^{+2}	Iones calcio
CAC	Contenido de ácido clorogénico
cm	Centímetro
col	Colaboradores
CV	Coefficiente de variación
DS	Desviación estándar
EC3G	Equivalentes de cianidina-3-glucósido
EM	Extracto metanólico
EUA	Estados Unidos de América
ff	Fruto fresco
g	Gramo (s)
GAE	Equivalentes de ácido gálico
GAL	Galactosidasa
GC-MS	Cromatografía de gases/Espectrometría de masas
H	Hora (s)

H ₂ O	Agua
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno
HCl	Ácido clorhídrico
HNO ₃	Ácido nítrico
HPLC	Cromatografía líquida de alta resolución
K ₂ HPO ₄	Fosfato dipotásico
kcal	Kilocaloría
kg	kilogramo
L	Litro
LDL	Lipoproteína de baja densidad (Low-density lipoprotein)
LSD	Diferencia mínima significativa (Least Significant Difference)
M	Mol
min	Minuto (s)
Mg	Miligramo (s)
mL	Mililitro (s)
mm	milímetros
MSR	Metodología de superficie de respuesta
N	Newton
NaCl	Cloruro de sodio
nm	Nanómetro (s)
pH	Potencial de hidrógeno
PM	Peso molar
PME	Pectinmetilesterasa
PG	Poligalacturonasa
POD	Peroxidasa
PPO	Polifenol oxidasa
PVPP	Polivinilpolipirrolidona
R ²	Coefficiente de determinación
S	Segundo
SPC	Síntesis de proteínas chaperonas

T	Temperatura
t	Tiempo
TH	Tratamiento hidrotérmico
ton	tonelada
UA	Unidades de Actividad
U/g	Unidades sobre gramo
UV-Vis	Ultravioleta Visible
vol	volumen
v/v	Volumen-volumen